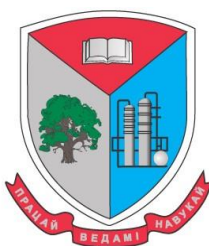


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



*Посвящается
95-летнему юбилею Белорусского государственного
технологического университета,
90-летию силикатного образования Беларуси,
Дню белорусской науки*

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
И ТЕХНИКА**

**Материалы докладов 89-й научно-технической конференции
профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников
и аспирантов (с международным участием)**

3–18 февраля 2025 года

Минск 2025

УДК 005.745 (06)(0.034)

Химическая технология и техника : материалы 89-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3–18 февраля 2025 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за издание И. В. Войтов. – Минск : БГТУ, 2025. – 613 с. ISBN 978-985-897-276-9.

Сборник составлен по материалам докладов научно-технической конференции сотрудников Белорусского государственного технологического университета, в которых отражены новые успехи и достижения в таких областях исследований, как охрана окружающей среды, разработка способов утилизации различных отходов, использование осадков сточных вод гальванических производств ведущих предприятий Беларуси, получение новых керамических материалов и создание высокоэкономичных источников общего освещения на основе светодиодов, нетрадиционные методы получения некоторых твердых растворов и изучение их физико-химических свойств, принципы синтеза роботизированного комплекса для процессов термической обработки металла и многое другое. Сборник предназначен для работников различных отраслей народного хозяйства, научных сотрудников, специализирующихся в соответствующих областях знаний, аспирантов и студентов ВУЗов.

Рецензенты:

Климош Ю.А., декан факультета ХТиТ, канд. техн. наук;
Левицкий И.А., проф. кафедры ТСКиВМ, д-р техн. наук;
Кузьменков М.И., проф. кафедры ТСКиВМ, д-р техн. наук;
Левданский А.Э., зав. кафедрой ПиАХП, д-р техн. наук;
Черник А.А., зав. кафедрой ХТЭХПиМЭТ, канд. хим. наук;
Карпович Д.С., зав. кафедрой АППиЭ, канд. техн. наук;
Шибека Л.А., доц. кафедры ПЭ, канд. хим. наук;
Гвоздева Н.А., доц. кафедры Х, ТЭХПиМЭТ, канд. техн. наук

Главный редактор

ректор, д-р техн. наук, профессор

Войтов И. В.

ISBN 978-985-897-276-9

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2025

Подсекция «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ»

УДК 666.21.6

И.А. Левицкий, проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

90 ЛЕТ СИЛИКАТНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ БЕЛАРУСИ

Кафедра технологии стекла и керамики (до 1996 г. – кафедра технологии силикатов) была образована в мае 1935 г. в Белорусском политехническом институте, хотя подготовка инженеров силикатного профиля была начата еще в 1930 г. в Химико-технологическом институте, на базе которого и был создан в 1933 г. Белорусский политехнический институт.

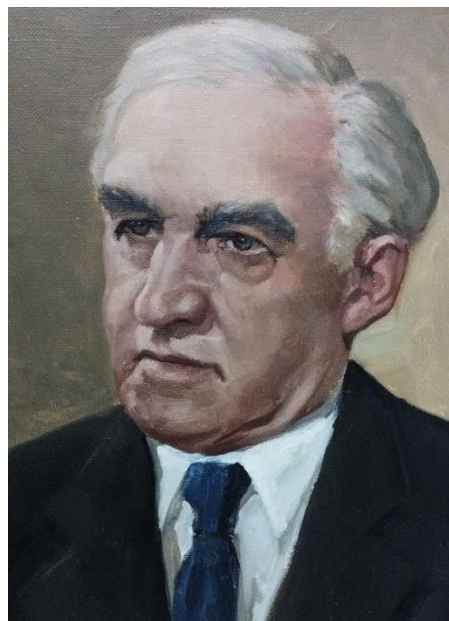
Организатором и первым заведующим кафедрой был доктор технических наук, профессор Михаил Алексеевич Безбородов, руководивший кафедрой в течение 25 лет, который создал первую научную школу специалистов силикатного производства в Республике Беларусь. За большой вклад в развитие науки о силикатах М. А. Безбородов в 1947 г. был избран академиком АН БССР, а в 1951 г. удостоен звания Лауреата Государственной премии СССР.

По инициативе М. А. Безбородова была создана в числе первых в Советском Союзе проблемная лаборатория стекла и силикатов в Белорусском политехническом институте и организована подготовка научных кадров по технологии силикатов в аспирантуре.

С 1960 г. кафедру возглавляли доктор технических наук, профессор Л. Я. Мазелев (1960–1964 гг.); доктор технических наук, профессор Н. Н. Ермоленко (1972–1976 гг.).

В 1975 г. из состава кафедры была выделена кафедра химической технологии вяжущих материалов.

В 1976 г. в связи с необходимостью сосредоточить подготовку инженерных кадров по химическим специальностям в одном вузе ка-



Безбородов
Михаил Алексеевич
(14.11.1898 – 03.02.1983)

факультета технологии силикатов, Проблемная научно-исследовательская лаборатория стекла и силикатов, а также кафедра технологии вяжущих материалов были переведены в Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова (в настоящее время Белорусский государственный технологический университет). Первой заведующей кафедрой технологии силикатов в БТИ в течение последующих 20 лет являлась доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Республики Беларусь Бобкова Нинель Мироновна (1976–1996 гг.).

С 1996 г. по 2016 г. руководил кафедрой доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь Левицкий Иван Адамович, а кафедра получила название – кафедра технологии стекла и керамики.

С июля 2016 г. кафедру возглавляет доцент, кандидат технических наук Павлюкевич Юрий Геннадьевич.

Кафедрой химической технологии вяжущих материалов заведовал профессор, доктор технических наук, Воробьев Николай Иванович (1976–1978 гг.), затем доктор химических наук, профессор Яглов Валерий Николаевич (1978–1985 гг.), с 1985 по 2008 гг. – заслуженный деятель науки Республики Беларусь, профессор, доктор технических наук Кузьменков Михаил Иванович. С 2009 по 2020 гг. кафедрой руководил кандидат технических наук, доцент Мечай Александр Анатольевич, в 2021–2022 гг. – кандидат технических наук, доцент Шалуха Наталья Михайловна.

В состав Проблемной научно-исследовательской лаборатории стекла и силикатов, которую в разное время возглавляли кандидаты технических наук Л. Г. Дашинский (1976–1980 гг.), А. М. Гришанович (1981–1985 гг.), С. Е. Баранцева (1985–1996 гг.), входил технологический отдел (руководители кандидаты технических наук З. Ф. Манченко и Г. Е. Рачковская) и отдел испытаний и внедрений (руководители кандидаты технических наук В. И. Русак и А. А. Ситнов). Совместно с кафедрой эффективно решались вопросы развития научной базы, строительства лаборатории высокотемпературного синтеза, ее оснащения газопламенными и электрическими печами, прецизионным, помольным и другим оборудованием, необходимым для решения задач по внедрению результатов актуальных и перспективных научно-исследовательских работ.

При БТИ был создан специализированный совет по защите диссертаций силикатного профиля, действующий и в настоящее время.

Для освещения и популяризации научных достижений ежегодно выпускался межведомственный сборник «Стекло, ситаллы и силикаты». Всего было издано 14 выпусков.

Огромный потенциал кафедр реализован в подготовке научных

кадров высшей квалификации. На базе выполненных научных исследований защищено 6 докторских диссертаций: Л. Я. Мазелевым (1961 г.), Л. А. Жуниной (1968 г.), Н. М. Бобковой (1969 г.), Н. Н. Ермоленко (1971 г.), И. В. Пищом (1991 г.), И. А. Левицким (1999 г.). В числе выпускников кафедры – доктора наук М. И. Кузьменков, В. Н. Яглов, Б. К. Демидович, С. Г. Ковчур, О. Г. Городецкая.

В деятельности кафедры выделился ряд актуальных и перспективных научных направлений, главными из которых явились следующие: разработка составов и технологии шлакоситаллов, жаро- и термостойких ситаллов промышленного и хозяйственного назначения; создание стекол и стекловидных покрытий для электронной техники и приборостроения; разработка термостойких и теплоизоляционных керамических материалов и пигментов; керамических материалов строительного и бытового назначения; легкоплавких глазурей для строительной и бытовой керамики; биоматериалов на основе стекол; исследования по расширению сырьевой базы силикатного производства и применению промышленных отходов, снижению расхода энергетических ресурсов в технологических процессах производства и многие другие.

За весь период существования кафедр и научных школ подготовлено и защищено свыше 185 кандидатских диссертаций, подготовлено около 2,5 тысяч инженеров силикатных производств – специалистов в области стекла, керамики и вяжущих материалов, 37 магистров.

1 сентября 2024 г. произошло объединение кафедр технологии стекла и керамики и химической технологии вяжущих материалов с образованием кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов. Заведующим кафедрой назначен Павлюкевич Ю. Г.

В 2023 г. осуществлен набор студентов на специальность «Промышленный дизайн».

В настоящее время ведется подготовка специалистов первой ступени обучения по специальностям «Технология стекла, керамики и вяжущих материалов», «Промышленный дизайн». Ведется также подготовка специалистов второй ступени обучения через магистратуру по 2-м специальностям «Технология вяжущих веществ, керамических и стекловидных материалов и изделий» и «Инновационные технологии силикатных строительных материалов и изделий».

Кафедра осуществляет подготовку специалистов высшей категории через докторантуру и аспирантуру. В настоящее время на кафедре проходят подготовку 2 докторанта и 4 аспиранта заочной формы обучения по специальности 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов».

В числе профессорско-преподавательского состава кафедры 2 профессора, доктора технических наук; 8 доцентов кандидатов технических наук, 2 старших преподавателя, кандидатов наук и 1 ассистент.

При кафедре созданы 2 отраслевые лаборатории и 4 филиала кафедры на ОАО «Керамин», ОАО «Гомельстекло», ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и ОАО «Белорусский цементный завод».

С 1945 г. на кафедре действует научная школа в области физико-химии силикатов и тугоплавких неметаллических материалов, созданная профессором М. А. Безбородовым.

Студенты и магистранты также активно вовлечены в научно-исследовательскую работу через студенческую научно-исследовательскую лабораторию «Химия и технология силикатов».

УДК 666.295

И.А. Левицкий, проф., д-р техн. наук;
М.В. Дяденко, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц.;
С.В. Струнец, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ЛАНТАНОСОДЕРЖАЩИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ ГЛАЗУРИ ДЛЯ КЕРАМОГРАНИТА

Актуальными задачами современного материаловедения является создание материалов, обеспечивающих антибактериальное действие. Это обусловлено широким распространением микроорганизмов и ростом их количества в различных средах, причиняя не только материальный вред, но, самое важное, здоровью людей. Поиск новых антибактериальных агентов поэтому становится все актуальнее в связи с постоянным ростом резистентности бактерий к действию лекарственных препаратов, антибиотиков и антисептиков.

В целях предотвращения заболеваемости людей, животных, биокоррозии зданий и сооружений, в мировой практике в настоящее время используется большое количество химических соединений, которые применяются как биоцидные и антикоррозионные агенты. Они вводятся в составы различных материалов или применяются для обработки поверхности строительных конструкций.

В зарубежной практике в числе таковых известно использование оксида лантана La_2O_3 , который применяется в составе комплекса оксидов для получения антибактериальных покрытий керамических изделий различного назначения [1–3].

Целью исследований является установление возможности использования La_2O_3 в составе полуфриттованных глазурей для керамогранита, обжигаемых при температуре 1200 ± 5 °С, обеспечивающих необходимый комплекс физико-химических свойств и декоративно-эстетических характеристик продукции, а также надежную антибактериальную защиту.

В исследованной системе сырьевых компонентов в качестве переменных составляющих исследовались доломит, вводимый в количестве от 17,5 до 22,5 %¹, а также фритта, синтезированная в системе $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, характеризующаяся высоким содержанием CaO . Температура ее варки составляла 1450 ± 10 °С и процесс получения осуществлялся в газопламенной печи. Фритта характеризовалась рентгеноаморфностью, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) ее составлял $67,2 - 67,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Оксид лантана (III) вводился техническим продуктом и исследовался в интервале содержания от 5,0 до 15,0 %. Интервал количества переменных составляющих варьировался с шагом 2,5 %.

В качестве постоянных компонентов сырьевой смеси для получения глазурных суспензий использовались также полевой шпат, вводимый в количестве 25 % и примерно в равных количествах глинозем, кварцевый песок марки ВС–0040–1, каолин и огнеупорная глина. Общее содержание постоянных компонентов составляло 45 %.

Помол сырьевых материалов осуществлялся мокрым способом до остатка на сите №0063 (9428 отв./см^2) в количестве 0,3 – 0,5 % в течение 50 мин в лабораторной мельнице Speedy (Италия). Суспензия процеживалась сквозь сито № 02 (980 отв./см^2) и наносилась с помощью фильеры на высушенный полуфабрикат керамогранита влажностью не более 1,5 %. Плотность глазурной суспензии находилась в интервале 1640–1670 кг/м³.

Образцы проходили сушку при температуре 105 ± 2 °С с последующим обжигом в промышленной конвейерной газопламенной печи типа FMS–2590 при температуре 1200 ± 5 °С в течение 50 ± 2 мин в условиях ОАО «Керамин» (г. Минск).

Полученные покрытия характеризовались матовой бархатистой фактурой, преимущественно полузаглушенностью, с высокой степенью растекаемости. Цвет глазурей изменялся в зависимости от количества вводимого La_2O_3 и характеризовался оттенками от светло- и каменно-серого при 5,0 – 7,5 % до белого при 10,0 и 15,0 % его содержания.

¹ здесь и далее по тексту приведено массовое содержание, %

Значения блеска и белизны покрытий, измеренные с помощью блеско-белизномера фотоэлектрического ФБ–2 (Россия), составляли $(10 - 17) \pm 1 \%$ и $(30 - 55) \pm 1 \%$ соответственно. Оба показателя возрастали с ростом содержания La_2O_3 .

Микротвердость глазурей находилась в интервале от 5440 ± 5 до 6058 ± 5 МПа и определялась с помощью прибора Wolpert Wilson (Германия).

ТКЛР глазурей исследовался на электронном dilatометре DIL 402 PC (Германия) в интервале температур $20 - 300$ °С и его значения лежали в интервале $(69,61 - 75,29) \pm 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ и определялись в основном содержанием оксидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Глазури обладали требуемыми значениями термостойкости, отвечали по истираемости 3-му классу, по устойчивости к образованию пятен – классу А, по химической устойчивости соответствовали классу GA. Данные определения свойств проводились в соответствии с ГОСТ 27180–2019 «Плитки керамические. Методы испытаний».

Опытные образцы глазурованного керамогранита отвечали требованиям ГОСТ 13996–2019 «Плитки керамические. Общие технические условия».

Исследования антибактериальной активности глазурного покрытия, содержащего 10 % La_2O_3 проводилось в Республиканском унитарном предприятии «Научно-практический центр гигиены», аккредитованный в Национальной системе аккредитации Республики Беларусь, в соответствии с ISO 22196:2011. Из полученных результатов следует, что образец глазури, содержащий 10 % La_2O_3 , обладал антибактериальной активностью к тест-штамму *Staphylococcus aureus* (золотистому стафилококку) ATCC 6538 составляющей 1,4, и к *Escherichia coli* (кишечная палочка) ATCC 8739 – 0,82.

Рентгенофазовым анализом поверхностного слоя глазурей с помощью дифрактометра D8 Advance (Германия), установлено, что присутствуют кристаллические фазы оксида лантана La_2O_3 и анортита ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$).

Дифференциальной сканирующей калориметрией с применением прибора DSC 404 F3 (Германия) установлены процессы термических процессов, происходящих при нагревании шихт глазурей. Наблюдался небольшой по интенсивности эндотермический эффект с минимумом при 363 °С, связанный с удалением гидратной влаги, содержащейся в глинистых минералах. Экзоэффект с небольшим максимумом при 561 °С обусловлен с переходом части La_2O_3 в LaO . При температуре $574,3$ °С присутствовал эндоэффект, вызванный модифи-

катионными изменениями кварца (β -кварц переходил в α -кварц). На кривой отмечается еще один эндоэффект, связанный с разложением доломита ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), который интенсивно протекал при температуре 779 °С с образованием CaCO_3 , MgO и CO_2 . В соответствии с экзоэффектом, максимум которого соответствует 886 °С, наблюдалась кристаллизация анортита. Данный экзоэффект нивелировался за счет наложения процесса декарбонизации CaCO_3 , входящего в состав доломита. Плавление фритты обусловлено эндоэффектом при температуре 1089 °С.

Электронно-микроскопическими исследованиями, выполненными с помощью электронного сканирующего микроскопа JSM-5610 LV (Япония), определено, что структура покрытий, содержащих 10 и 15 % La_2O_3 значительно отличается по типу кристаллических образований, что иллюстрирует рисунок.

При содержании 7,5 % La_2O_3 кристаллы на поверхности глазури располагались сравнительно неравномерно. Стекловидная фаза составляла здесь примерно 25 %.

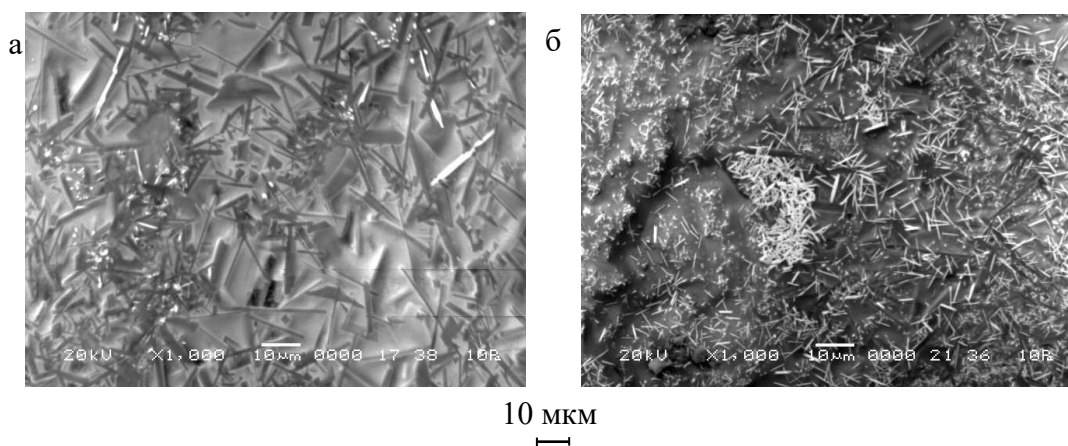


Рисунок – Электронно-микроскопические снимки глазурного покрытия содержащего 10 % (а) и 15 % (б) La_2O_3

Преобладали листовато-волокнистые образования с длиной от 5 до 20 мкм.

При повышении содержания La_2O_3 до 15 % характер структуры существенно изменялся. Здесь формировались более мелкие кристаллы, близкие по габитусу к пластинчатым, которые неравномерно располагались по поверхности покрытия, образуя их скопления и конгломераты, размеры их составляли от 8 до 12 мкм.

Проведенные исследования показали перспективу использования оксида лантана (III) при получении полуфриттованных глазурей для керамогранита, которые обладают высокими значениями белизны

и требуемыми физико-химическими свойствами, включая антибактериальную активность.

ЛИТЕРАТУРА

1 Антибактериальная глазурь: пат 108585507А Китай, Xing Shuqin; заявитель: Jieshou City Wei Sheng Kiln Painted Pottery Development Co Ltd; 16.07.2018; опубл. 28.09.2018 // [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN108585507A/en?q=CN+108585507>. Дата доступа: 16.10.2024.

2 Керамическая глазурь с композиционной антибактериальной функцией: пат 105731801А Китай, Huang Qunhao; заявитель: Huang Qunhao; 30.12.2015; опубл. 06.07.2016 // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [https://patents.google.com/patent/CN105731801A/en?q=\(antibacterial+glaze+La₂O₃\)&patents=false&oq=antibacterial+glaze+La₂O₃](https://patents.google.com/patent/CN105731801A/en?q=(antibacterial+glaze+La2O3)&patents=false&oq=antibacterial+glaze+La2O3). Дата доступа: 16.10.2024.

3 Антибактериальная глазурь, содержащая экстракт традиционной китайской медицины: пат 105503162А Китай, Huang Qunhao; заявитель: Huang Qunhao; 30.12.2015; опубл. 20.04.2016 // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN105503162A/en?q=false&oq=page=1>. Дата доступа: 16.10.2024.

УДК: 631.895

О.Б. Дормешкин, проф., д-р техн. наук;
А.Н. Гаврилюк, доц., канд. техн. наук;
А.А. Бышик, инженер, М.С. Мохорт, асп.
(БГТУ, г. Минск)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЩЕЛОЧНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ БУРЫХ УГЛЕЙ БРИНЁВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Рост численности населения совместно с возрастающими потребностями приводят к сокращению сельскохозяйственных земель. С 1950 по 2024 г. мировое население возросло в более чем в 3 раза, что привело к снижению площади пахотных земель с 0,45 до 0,18 га на душу населения. Глобальной проблемой также является снижение качества сельскохозяйственных угодий, обусловленное интенсивным землепользованием без возможности восстановления земельных ресурсов.

Гуминовые вещества (далее ГВ) – это сложные смеси устойчивых к биодеструкции высокомолекулярных темноокрашенных органических соединений природного происхождения, образующихся при разложении растительных и животных остатков под действием микроорганизмов и абиотических факторов среды.

Многообразная роль ГВ в почвообразовательных процессах в значительной мере определяется содержанием в них большого количества функциональных групп, являющихся диагностическим показателем степени гумификации органических веществ почвы. Велика роль ГВ в улучшении физических свойств почв, создании оптимального водно-воздушного режима. ГВ предотвращают вымывание минеральных удобрений и способствуют охране окружающей среды.

Убыль ГВ обуславливается двумя группами факторов: механическими и биологическими. Значительная часть потерь связана с эрозийными процессами. Биологический фактор оказывает существенное влияние на дегумификацию почв при сочетании с рядом неблагоприятных условий в интенсивном земледелии. При внесении минеральных удобрений микрофлора почвы усиленно их потребляет, разрушая при этом перегнойные вещества почвы. Помимо этого, водорастворимые продукты минерализации органических веществ теряются в результате вымывания, особенно в условиях промывного водного режима почв [1].

Удобрения с высоким содержанием гуминовых и фульвокислот оказывают комплексное воздействие на почву, улучшают её физические, химические и биологические свойства.

Республика Беларусь обладает значительными ресурсами экологически чистого сырья, способного обеспечивать производство промышленных органических и ОМУ как для внутреннего потребления, так и имеющих значительный экспортный потенциал на глобальных рынках. В качестве сырья для производства ОМУ на основе ГВ могут применяться: углефицированные материалы, торф и донные отложения, органические отходы, а также сланцы и некоторые виды почв. Запасы бурого угля в Республике Беларусь оцениваются в 1,5 млрд т., разведанные – более 160 млн т. Основными месторождениями являются Бриневское, Житковичское, Тонежское, Лельчицкое.

Высокая степень гумификации бурых углей, естественная влажность и зольность делают нецелесообразным применение их для энергетических нужд, однако они могут быть использованы для получения ГВ и продуктов на их основе. В качестве исходного сырья были выбраны бурые угли Бринёвского месторождения. Химический состав бурого угля представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав бурого угля Бринёвского месторождения

Компоненты, %								
1. Органическая масса угля – 72,518, в том числе:								
Гуминовые кислоты			Фульвокислоты			Гумин		
55,543			3,017			13,958		
2. Неорганическая масса угля – 27,482, в том числе:								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₄ ²⁻	P ₂ O ₅
16,551	3,268	2,904	2,362	0,952	0,399	0,195	0,097	0,086

Не один из известных методов получения ОМУ не обходится без применения щелочных реагентов для извлечения ГК из органического сырья и перевода их в растворимую форму. При этом основными факторами, влияющим на процесс экстракции являются природа органического сырья, концентрация щелочных реагентов, температура, продолжительность процесса и гидродинамические параметры.

Сложность и неоднозначность состава и структуры органического вещества углей обуславливают необходимость проведения исследований для конкретного месторождения с установлением оптимальных параметров процесса экстракции.

Первая серия экспериментов направлена на установление влияния концентрации гидроксида калия на скорость процесса и выход ГВ. Концентрация КОН изменялась в диапазоне 0,5–5 %, при продолжительности процесса 1–24 часа и температуре 25 °С.

Исследования показали, что с увеличением концентрации КОН возрастает скорость экстракции, при этом максимальный выход ГВ 99,2–99,6 % наблюдается для 1–2 % КОН при продолжительности процесса более 20 ч, что подтверждает литературные данные о более низком выходе ГК из концентрированных растворов щелочей, в результате протекания процессов гидролиза [2].

Вторая серия экспериментов направлена на установление влияния температуры процесса на скорость экстракции и выход ГВ. Температура процесса изменялась в диапазоне 20 – 90 °С, при продолжительности экстракции 0,5–5 ч и концентрации КОН – 3 %.

Анализ полученных данных показал, что с увеличением температуры процесса экстракции возрастает его скорость и соответственно выход ГВ, однако это также приводит и к увеличению скорости процессов разрушения ГВ. Так при температуре более 70 °С и продолжительности экстракции свыше 3 часов количество разрушаемых ГК в единицу времени превышает количество экстрагируемых ГВ, что приводит к снижению выхода ГВ.

Третья серия экспериментов направлена на установление влияния соотношения реагентов на скорость экстракции и выход ГВ. Соотношение реагентов измерялось отношением Ж : Т (Ж – количество

раствора КОН заданной концентрации, Т – количество БУ, взятого для экстракции), и изменялось в диапазоне 4–12, концентрация растворов КОН изменялась в диапазоне 2–7 %, продолжительность процесса экстракции 1 ч, температура – 70 °С.

Установлено, что при уменьшении соотношения Ж : Т менее 8 происходит резкое снижение скорости экстракции и выхода ГВ, что обусловлено резким возрастанием вязкости смеси и снижением избытка гидроксида калия. Также установлено, что изменение концентрации гидроксида калия оказывает большее влияние на скорость процесса и выход ГВ, чем соотношение Ж : Т, при одинаковом избытке КОН.

Характеристики гумата калия и неэкстрагируемого остатка (НЭО), получаемых при оптимальных параметрах представлены в таблице 2. Гумат калия содержит до 5 % свободного КОН, наличие которого обусловлено применением его избыточного количества с целью увеличения скорости экстракции. При получении ОМУ избыточная щелочность нейтрализуется вводимыми минеральными компонентами. В случае же получения в качестве продукта гумата калия, избыточная щелочность может быть нейтрализована гуминовой кислотой, полученной за счёт нейтрализации части гумата калия минеральными кислотами, с последующей отмывкой осадка ГК и растворении их в щелочном экстракте. Образующиеся при этом соли калия и растворённые ФК могут быть использованы в производстве ОМУ.

Таблица 2 – Характеристики гумата калия и неэкстрагируемого остатка

Параметр	Гумат калия	Неэкстрагируемый остаток
Содержание на сухое вещество, %		
1. Гуминовые вещества, в т.ч.:	94,280	32,527
Гуминовые кислоты	69,154	23,858
Фульвокислоты	3,756	1,296
Калий (гумат и фульват калия)	21,370	7,373
2. Азот (органический)	2,287	0,737
3. Гумин	–	40,451
4. Неорганический остаток	–	20,788
5. Калий в расчёте на K ₂ O, в т.ч.:	4,002	3,277
Водорастворимый	4,002	1,395
Усвояемый	–	1,883
Растворимость, %	100	34,01
pH	10,95	10,24

На основании анализа состава НЭО видно, что гидроксид калия реагирует не только с гуминовой и фульвокислотой, но и с гумином переводя часть калия из водорастворимой формы в усвояемую. НЭО возможно использовать как компонент ОМУ, содержащих балласт-

ную массу, при этом с целью повышения содержания ГВ возможно проведение процесса окисления.

Выполненный цикл исследований позволил определить оптимальные параметры щелочной экстракции ГВ: температура – 70 °С, концентрация КОН – 5 %, продолжительность процесса – 2 часа, соотношение Ж:Т – 8.

Распределение ГВ: гумат калия – 85,18 % от исходного количества в БУ; НЭО – 14,82 %, из них 11,22 % растворимые ГВ. Суммарный выход свободных ГВ составил 96,4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Синьюй, Банецкая Е. В., Цзян Юй, Ми Ган, Вэй Жань Влияние длительного применения различных удобрений на популяции микроорганизмов и ферментативную активность почвы // Агро-наука. –2023. – Т. 1. – № 1. – С.134–141.

2. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of Soil Analysis Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006, p. 993.

УДК 666.11.01

М.В. Дяденко, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц.;

И.А. Левицкий, д-р техн. наук, проф.;

И.И. Курило, зав. каф., канд. хим. наук;

В.Г. Лугин, доц., канд. хим. наук;

А.С. Глинский, мл. науч. сотр.;

А.Д. Подсосонная, мл. науч. сотр.; асп. А.А. Ширвель
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ Na₂O–CaO–ZnO–SiO₂–P₂O₅ НА ИХ БИОАКТИВНОСТЬ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Способность биоактивных стекол растворяться в биологических жидкостях и модельных внеклеточных растворах является одним из определяющих факторов формирования материала, близкого к костной ткани, обуславливая его широкое применение в медицине. Такие материалы обладают остеоиндуктивностью, так как продукты их растворения активируют гены, отвечающие за развитие и повышение уровня организации клетки или ткани.

Образование гидроксиапатита на поверхности биоактивных стекол, погруженных в соответствующие физиологические растворы и жидкости, является индикатором их биологической активности.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение влияния соотношения $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$, а также суммарного содержания ($\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$) на биоактивность стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ и устойчивость их стеклообразного состояния.

Массовое содержание основных оксидов и их соотношение представлены в таблице ниже.

Таблица – Массовое содержание основных оксидов опытных стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ и их соотношение

№ состава	SiO_2+ZnO	CaO	P_2O_5	Na_2O	$\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$	$\text{CaO/P}_2\text{O}_5$
1	58,5	7,0	2,0	32,5	39,5	3,5
2	58,5	8,0	2,0	31,5	39,5	4,0
3	58,5	9,0	2,0	30,5	39,5	4,5
4	58,5	10,0	2,0	29,5	39,5	5,0
5	58,5	8,7	2,5	30,3	39,0	3,5
6	58,5	10,0	2,5	29,0	39,0	4,0
7	58,5	11,2	2,5	27,8	39,0	4,5
8	58,5	12,5	2,5	26,5	39,0	5,0
9	58,5	10,5	3,0	28,0	38,5	3,5
10	58,5	12,0	3,0	26,5	38,5	4,0
11	58,5	13,5	3,0	25,0	38,5	4,5
12	58,5	15,0	3,0	23,5	38,5	5,0
13	58,5	12,2	3,5	25,8	38,0	3,5
14	58,5	14,0	3,5	24,0	38,0	4,0
15	58,5	15,7	3,5	22,3	38,0	4,5
16	58,5	17,5	3,5	20,5	38,0	5,0

Синтез низкокремнеземистых стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ осуществляли в корундовых тиглях в газовой пламенной печи периодического действия при максимальной температуре 1450 ± 10 °С с выдержкой при ней 1 ч. После этого полученные образцы отжигали в муфельной печи при температуре 540 ± 5 °С для снятия внутренних напряжений.

Изучение устойчивости стеклообразного состояния опытных стекол осуществляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием калориметра DSC 404 F3 Pegasus, Netzsch.

Установлено, что с повышением содержания оксида кальция, вводимого взамен Na_2O , и соотношения $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ склонность опытных стекол к кристаллизации увеличивается, что сопровождается ростом интенсивности экзотермических пиков.

В исследуемых стеклах, в составе которых содержится повышенное количество CaO , более выраженная склонность к кристаллизации связана с химическим сродством ионов Ca^{2+} к ионам фосфора [1].

Определяющим моментом при выборе биоактивных стекол является достаточно широкий интервал $T_x - T_g$ (где T_g – температура стеклования, $^{\circ}\text{C}$, T_x – температура начала кристаллизации, $^{\circ}\text{C}$), что позволяет осуществлять термическую обработку биостекла без проявления признаков кристаллизации.

Следует отметить, что с ростом содержания оксида P_2O_5 от 2,0 до 3,5 мас. % при постоянном соотношении $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ наблюдается сужение температурного интервала выделения кристаллических фаз и их количества.

Таким образом, ширина рабочего диапазона $T_x - T_g$ определяется содержанием оксида кальция и массовым соотношением $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, при этом оптимальные показатели достигаются при содержании CaO не более 10,5 мас. %.

Изучение плотности опытных стекол позволяет оценить степень миграции ионов, входящих в их состав, в биологическую жидкость.

Методом гидростатического взвешивания установлено, что плотность стекол изменяется в пределах 2770–2810 $\text{кг}/\text{м}^3$.

С повышением содержания CaO , вводимого взамен оксида натрия, в целом плотность опытных стекол возрастает.

Рост плотности исследуемых стекол с ростом соотношения $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ от 3,5 до 5,0 вызван увеличением доли ионов кальция при одновременном снижении крупных по размеру ортофосфатных анионов, определяющих рост мольного объема стекол.

Для определения интенсивности биологического разрушения материалов в лабораторных условиях используют модельные среды. В настоящей работе в качестве таковой определен PBS-раствор.

Благодаря стабильности его pH использование такой модельной среды позволяет изучать долговременное поведение и стабильность материала без значительного высвобождения ионов кальция и фосфатов для формирования гидроксиапатита.

По результатам исследований определено, что характер изменения pH PBS-раствора носит параболический характер, при этом максимальная величина наблюдается в случае его взаимодействия с образцами в течение 7–14 сут. При содержании оксида P_2O_5 , составляющем 3,0 мас. %, наблюдается наибольшее изменение pH.

В процессе проведения эксперимента раствор PBS всегда сохранял свою прозрачность.

Для понимания процесса растворения стекла важно также исследовать изменение массы образцов стекла при долговременном погружении в PBS-раствор.

Установлено, что в исследуемом диапазоне соотношений $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ и при различном содержании P_2O_5 уменьшение массы образца стекла, погруженного в PBS-раствор, от времени выдержки изменяется в соответствии с линейным законом.

Минимальные потери массы характерны для образцов, содержащих 2,0 мас. % P_2O_5 , независимо от соотношения $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$.

Формирование кристаллов кальцийфосфатной фазы на поверхности исследуемого образца, погруженного в соответствующую модельную физиологическую жидкость (SBF-раствор), является признаком его биоактивности.

Изучено влияния продолжительности выдержки монолитных образцов стекол в модельном SBF-растворе на величину его pH.

На рисунке 1 представлена зависимость pH SBF-раствора, замедленного которого осуществлялась через фиксированные промежутки времени, от продолжительности его взаимодействия с монолитными образцами стекол.

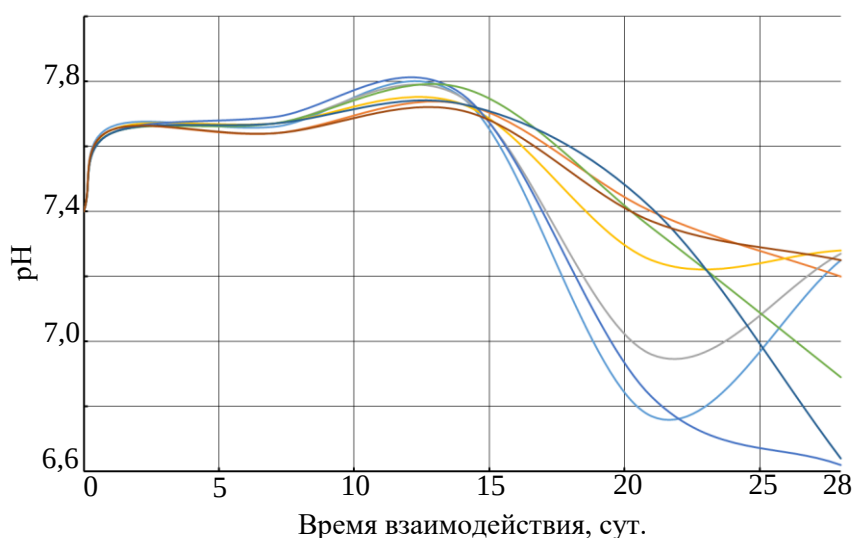


Рисунок 1 – Зависимость pH SBF-раствора от времени его взаимодействия с монолитными образцами стекол

Как следует из рисунка 1, в течение первых суток значения pH SBF-раствора повышались до 7,63–7,69 ввиду протекания процесса выщелачивания ионов из объема стекла.

Значения pH SBF-раствора практически стабилизировались через 24 ч. В течение следующих 6–7 суток pH модельного раствора практически не изменялся.

В последующие 7 суток pH модельного раствора возрастал до значений 7,7–7,8. Взаимодействие с SBF-раствором на протяжении 15–21 суток обуславливала снижение его pH до различных уровней, определяемых химическим составом стекла, в результате образования аморфного слоя, исключающего доступ модельного раствора к внутренним слоям стекла.

На рисунках 2 и 3 представлены электронно-микроскопические снимки поверхности образцов опытных стекол при массовом соотношении $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, составляющем 3,5 и 5,0, и содержании оксида P_2O_5 3,0 и 3,5 мас. %.

Как следует из рисунков 2 и 3, образование предположительно кристаллов кальцийфосфатной фазы зависит от содержания P_2O_5 и соотношения $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$. Средний размер кристаллических образований составляет 5–10 мкм.

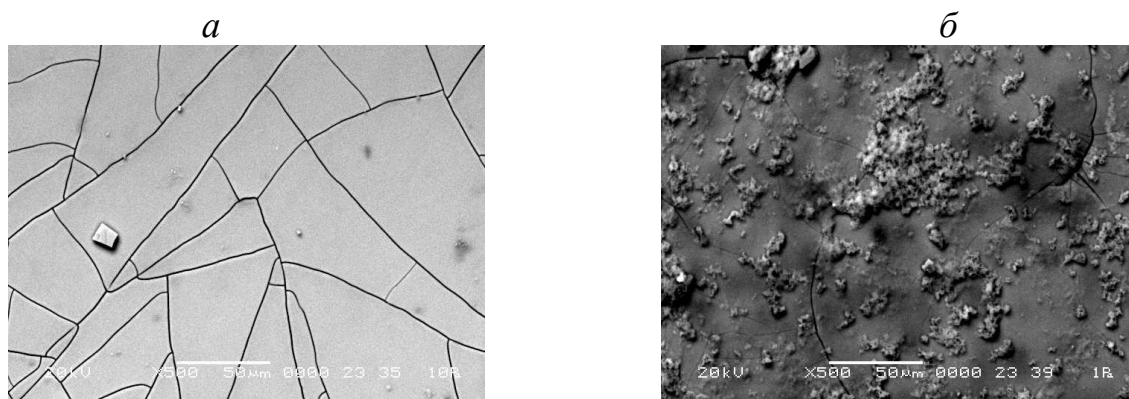


Рисунок 2 – Электронно-микроскопические снимки поверхности опытных образцов стекол, включающих 3,0 мас. % P_2O_5 , при соотношении:
a – $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ – 3,5; *б* – $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ – 5,0

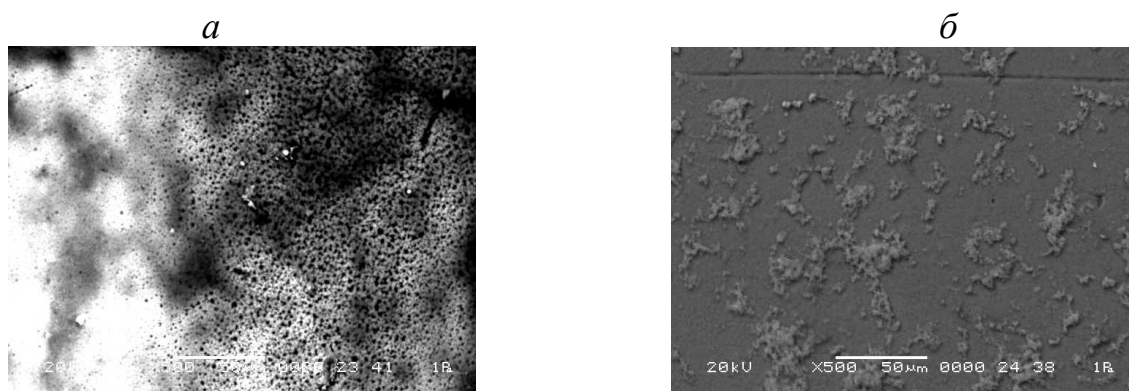


Рисунок 3 – Электронно-микроскопические снимки поверхности опытных образцов стекол, включающих 3,5 мас. % P_2O_5 , при соотношении:
a – $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ – 3,5; *б* – $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ – 5,0

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что наибольшую биоактивность проявляют стекла исследуемой области системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ с соотношением $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, составляющим 5,0, включающие 3,0–3,5 мас. % P_2O_5 .

*Исследования выполнены при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 2.2.10 (НИР 1)
ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» подпрограммы «Синтез и направленное модифицирование регуляторов биопроцессов».*

ЛИТЕРАТУРА

1 Wacławska I., Szumera M. Influence of MgO (CaO) on the structure of silicate-phosphate glasses TA and NMR study // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2006. – Vol. 84. – № 1. – P. 185–190.

УДК 666.1.001.5

М.В. Дяденко, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц.;
И.А. Левицкий, д-р техн. наук, проф.;
А.С. Глинский, стажер мл. науч. сотр.
(БГТУ, г. Минск)

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ MgO , ZnO И SrO НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$

Разработка составов биостекол предполагает как изучение особенностей их взаимодействия с биологической жидкостью человека, так и комплекса физико-химических и технологических свойств. Составы биостекол содержат модифицирующие катионы, наличие которых способствует деполимеризации их кремнекислородного каркаса, формированию структурных полостей, обуславливающих снижение локальной симметрии структурной сетки стекла и, как результат, повышение его растворимости в биологической среде [1].

Кроме того, использование оксидов-модификаторов позволяет регулировать химическую и кристаллизационную устойчивость опытных стекол, а также величину их плотности.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение влияния содержания оксидов MgO , SrO , ZnO на комплекс физико-химических свойств стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$.

В базовый состав стекла системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$, включающий, мас. %: 55 SiO_2 и 41,5 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{P}_2\text{O}_5$), вводились последовательно оксиды MgO , SrO и ZnO взамен SiO_2 в количестве от 3,5 до 11,0 мас. % с шагом 2,5 мас. %.

Выбор оксидов магния, цинка и стронция обусловлен их способностью участвовать в процессе резорбции костной ткани и лечении остеопороза, а также оказывать бактерицидное действие.

Наличие в составе опытных стекол значительного количества оксидов натрия, кальция, магния, стронция и цинка обуславливает формирование немоستيковых атомов кислорода, определяющих разрывы в структурной сетке стекла, и, как результат, процесс деградации и высвобождения ионов. По мере увеличения количества немоستيковых атомов кислорода биологическая активность материала возрастает.

Ввиду этого указанные стекла склонны к неконтролируемой кристаллизации не только в процессе их термообработки, но и выработки в дальнейшем, препятствуя ионному обмену между стеклом и биологической жидкостью [2]. Вместе с тем, склонность стекол к кристаллизации определяет их высокую реакционную способность, которая зависит от степени деполимеризации и подвижности структурного каркаса такого стекла и определяет его высокую биоактивность. В связи с этим приемлемыми являются составы стекол, которые кристаллизуются, но при этом обладают достаточно широким температурным интервалом $T_x - T_g$ (где T_g – температура стеклования, °C, T_x – температура начала кристаллизации, °C), позволяющим осуществлять термическую обработку биостекла (спекание порошка биостекла или вытягивание волокна) без проявления признаков кристаллизации [3].

Для оценки кристаллизационной способности синтезируемых стекол проведено их изучение методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

Выявлено, что повышение содержания MgO, вводимого взамен SiO₂ в количестве от 3,5 до 11,0 мас. %, вызывает увеличение интервала $T_x - T_g$ на 90 °C, а SrO – на 100 °C, что свидетельствует о повышении технологичности опытных стекол.

На кривых ДСК присутствуют эндоэффекты, соответствующие температуре начала размягчения стекол, при этом рост данного показателя с повышением содержания оксида магния от 3,5 до 11,0 мас. % составляет порядка 3,5 °C, для ZnO – 13 °C, а SrO – 40 °C.

На наш взгляд, повышение показателей T_g при замене SiO₂ оксидами магния, цинка и стронция можно объяснить более высокой прочностью и средней плотностью на единицу объема поперечных химических связей между катионом R^{2+} (где R^{2+} – Mg²⁺, Sr²⁺, Zn²⁺) и немоستيковыми атомами кислорода. Этим обеспечивается жесткость структурного каркаса стекла [4].

С ростом содержания MgO разница между температурами стеклования и деформации уменьшается, что свидетельствует о менее выраженном разбросе в показателях прочности химических связей.

С целью оценки скорости развития и протекания процессов кристаллизации для исследуемых стекол определен критерий Груби. Установлено, что более выраженная устойчивость стеклообразного состояния в исследуемом ряду характерна для магнийсодержащих стекол.

Таким образом, предпочтение следует отдать магний- и цинксодержащим составам, так как температура начала размягчения таких стекол характеризуется минимальными значениями в сравнении со стронцийсодержащими составами.

Плотность биоактивных стекол является индикатором взаимной диффузии ионов из стекла в модельный раствор. Различия в структурном расположении и стабильности координационных центров щелочных и щелочноземельных катионов определяют механизм их миграции и скорость растворения стекла.

Плотность опытных стекол, изученная методом гидростатического взвешивания, изменяется в пределах от 2663 до 3256 кг/м³.

Введение в состав стекол бинарного сочетания оксидов щелочноземельных металлов с резко отличающимися по величине ионными радиусами приводит к формированию плотной упаковки структурных элементов [5].

Выявлено, что в интервале до 8,5 мас. % по влиянию в сторону увеличения плотности оксиды располагаются в ряд $\text{MgO} \rightarrow \text{SrO} \rightarrow \text{ZnO}$, что обусловлено различием в плотности вводимых оксидов цинка, стронция и магния (рисунок).

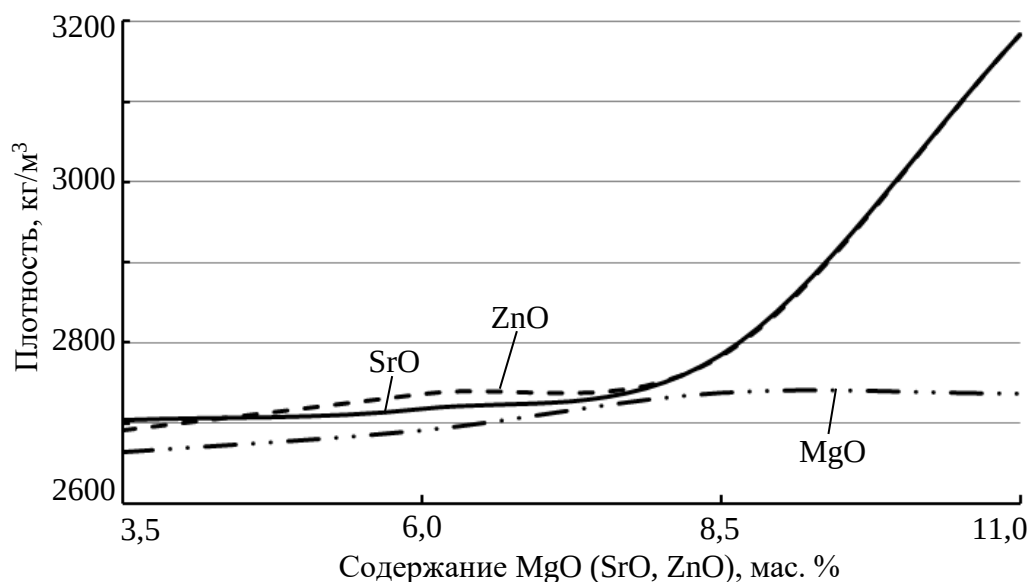


Рисунок – Сравнительное влияние MgO, SrO и ZnO на плотность опытных стекол

Использование ZnO и SrO в количестве более 8,5 мас. % обуславливает рост плотности по экспоненциальной зависимости, что вызвано более высокими молекулярными массами вводимых оксидов (SrO – 103,62 г/моль, ZnO – 81,39 г/моль, MgO – 61,98 г/моль).

Таким образом, оптимальные показатели плотности, при которых будет обеспечиваться требуемая диффузия катионов из стекла в водный раствор, достигаются введением оксидов MgO, SrO и ZnO в количестве 3,5–8,5 мас. %.

Микротвердость стекла отражает прочность химических связей его поверхностного слоя, изменение межатомных и межмолекулярных связей в стеклах и определяется количественным соотношением компонентов, степенью связности структурного каркаса стекла, а также природой катиона-модификатора.

Микротвердость опытных стекол, измеренная по методу Виккерса, находится в пределах от 4030 до 5020 МПа.

Установлено, что по влиянию в сторону повышения микротвердости оксиды располагаются в ряд $\text{MgO} \rightarrow \text{ZnO} \rightarrow \text{SrO}$, при этом зависимость носит нелинейный, близкий к параболическому характер. По-видимому, это вызвано конкурирующим влиянием двух факторов: прочности связи катион–кислород и относительного количества структурных группировок, формируемых MgO, SrO и ZnO.

С ростом содержания вводимых оксидов до 6–8,5 мас. % микротвердость опытных стекол несколько снижается ввиду уменьшения относительного содержания мостиковых связей Si–O–Si.

При последующем увеличении количества вводимых оксидов до 11,0 мас. % значения микротвердости возрастают. По-видимому, это связано с присутствием в составе стекол катионов Ca^{2+} и Sr^{2+} с различными по величине ионными радиусами, что вызывает повышение механических свойств [5].

Таким образом, получение порошка на основе биостекол будет менее энергетически затратным при использовании магний- и цинксо-державших составов.

Внутриклеточная и внеклеточная реакция биоактивного стекла зависит от степени высвобождения растворимых ионных форм кремния, кальция, фосфора и натрия с его поверхности. Растворимость стекла возрастает по мере уменьшения его структурной связности: стекла с невысокой степенью структурной связности являются потенциально биологически активными.

Склонность стекла к растворению косвенно оценивается его химической устойчивостью по отношению к реагентам I группы. Установлено, что опытные стекла относятся к III гидролитическому классу.

Также изучено влияние оксидов магния, стронция и цинка на характер температурной зависимости вязкости.

Установлено, что оксид SrO в исследуемом диапазоне концентраций в максимальной степени повышает вязкость опытных стекол. Как известно [6], в стронцийкальциевых стеклах при достаточно высокой концентрации катиона Ca^{2+} с малым ионным радиусом вязкость возрастает из-за увеличения прочности ионных связей Si-O-Me^{2+} , способствующих поперечной полимеризации кремнекислородных тетраэдров.

Влияние изучаемых оксидов группы RO на вязкостные характеристики подчиняется правилу радиуса: с ростом радиуса вводимого катиона показатели вязкости смещаются в высокотемпературную область.

Таким образом, с точки зрения технологичности при разработке составов стекол с комплексом биоактивных свойств предпочтение следует отдавать магнийсодержащим составам, а количество оксидов стронция и цинка следует ограничивать содержанием 3,5–6,0 мас. %.

Выводы, сделанные при исследовании вышеуказанных свойств, подтверждены результатами изучения структуры исследуемых стекол методом инфракрасной спектроскопии.

Таким образом, по результатам изучения влияния оксидов магния, стронция и цинка на комплекс технологических и физико-химических свойств стекол системы $\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ установлено, что предпочтительным является использование MgO в количестве 3,5–8,5 мас. %, а SrO – 3,5–6,0 мас. %.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 2.2.10 (НИР 1) ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» подпрограммы «Синтез и направленное модифицирование регуляторов биопроцессов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Заяц Н.И. Разработка стеклокристаллических материалов для костного эндопротезирования: диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.17.11 / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск: БГТУ, 1997. – 170 с.
2. Marchi J. Biocompatible Glasses: From Bone Regeneration to Cancer Treatment. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 336 p.
3. Souza M.T., Rennó A.C.M., Peitl O., Zanotto E.D. New highly bioactive crystallization-resistant glass for tissue engineering applications // Transl. Mater. Res. – 2017. – Vol.4. – P. 014002.
4. Ben-Arfa B.A.E., Miranda Salvado I.M., Ferreira J.M.F., Pullar R.C. The effect of functional ions (Y^{3+} , F^- , Ti^{4+}) on the structure,

sintering and crystallization of diopside-calcium pyrophosphate bioglasses / Journal of Non-Crystalline Solids. – 2016. – Vol. 443. – P. 162–171.

5. Бобкова Н.М., Русак В.И., Трунец И.А., Силич Л.М. Исследование стеклообразования в системе $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--BaO}$ // Стеклообразные системы и новые стекла на их основе: мат-лы Всесоюзного совещания. – М.: ВНИИНТИиЭПСМ, 1971. – С. 201–203.

6. Штейнберг Ю.Г., Зорина М.Л. Вязкость и структура стронциевых силикатных стекол на основе равновесных систем $\text{SrSiO}_3\text{--MeSiO}_3$ // Стеклообразные системы и новые стекла на их основе: мат-лы Всесоюзного совещания. – М.: ВНИИНТИиЭПСМ, 1971. – С. 113–117.

УДК 666.9.022.2

М.И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;

Е.В. Лукаш, доц., канд. техн. наук;

Н.М. Шалухо, доц., канд. техн. наук;

Д.М. Кузьменков, ст. преп., канд. техн. наук;

М.К. Анкуда, ассист.

(БГТУ, г. Минск)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

В последние годы в цементной промышленности все более широкое применение находят отходы смежных отраслей промышленности вместо природного – карбонатного и глинистого сырья используют алюмосиликатные техногенные продукты (шлаки, золы и др.).

В зарубежной практике эксплуатируется ряд цементных предприятий, производящих цемент из техногенных отходов. В России в 1980-е годы доля отходов в производстве цемента достигала 26 % (на выпуск 83 млн. т. цемента из 137 млн. т. сырьевых материалов 36 млн. т. было заменено отходами). В настоящее время этот показатель по разным причинам снизился до 15–17 %. Это касается, в том числе, и фосфогипса, учитывая, что к настоящему времени в России по данным [1] в отвалах предприятий его скопилось около 430–430 млн т., в Республике Беларусь – более 22 млн. т. [2].

В производстве портландцемента применение фосфогипса позволяет регулировать сроки схватывания цемента и способствует снижению температуры обжига клинкера.

Апатиты являются одним из высококачественных сырьевых материалов для получения экстракционной фосфорной кислоты. Сегодня это сырье является дефицитным. В связи с этим многие заводы, в том числе и ОАО «Гомельский химический завод», переходят на исполь-

зование других видов фосфатного сырья, в частности, фосфориты из Северной Африки и Казахстана, в которых содержится до 30 мас. % различных минеральных примесей. Минеральные примеси на стадии экстракции не могут оставаться индифферентными, контактируя с «букетом» минеральных кислот – H_2SO_4 , H_3PO_4 , H_2SiF_6 , HF . К сожалению, в доступной литературе нет сведений, касающихся химического взаимодействия примесей с минеральными кислотами. Производителей экстракционной фосфорной кислоты и удобрений на ее основе в первую очередь интересует количество и качество фосфорной кислоты. Фосфогипс в виде полу- или дигидрата сульфата кальция, образующийся в процессе экстракции, всегда отправляли в отвал, в качестве не востребуемого отхода, загрязняющего окружающую среду. Исходя из вышеизложенного, упомянутая проблема должна быть обязательно изученной, что позволит в конечном итоге найти техническое решение либо по обезвреживанию образующихся химических продуктов вследствие взаимодействия примесей с минеральными кислотами, либо иное техническое решение.

В настоящее время фосфогипс, полученный по полугидратному способу и подвергающийся сухой нейтрализации известью, нуждается в тщательной апробации в составе различных бетонов, где может использоваться цемент с таким регулятором сроков схватывания. Такая необходимость продиктована прежде всего тем, что не цемент, а бетон является конечным товарным продуктом в цепочке «сырье – цемент – бетон».

Проблема фосфогипса является не единственной на химических предприятиях. Не менее важное значение имеет и другой техногенный отход – шлам станции нейтрализации ОАО «Гомельский химический завод», который образуется вследствие нейтрализации известковым молоком кислых стоков, поступающих из цехов по производству серной, фосфорной кислоты и фторсолей. Введение шлама станции нейтрализации в состав сырьевой смеси в количестве 0,5–1,5 % обеспечивает интенсификацию обжига цементного клинкера во вращающейся печи, что позволяет снизить температуру обжига с 1450 до 1300–1350 °С и за счет этого уменьшить расход топлива на обжиг [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. П. Проблемы и перспективы использования вторичных продуктов переработки природных фосфатов для получения строительных материалов / А. П. Ильин, С. П. Кочетков, С. В. Брыль, Г. В. Рухлин // Экология и строительство. – 2016. – № 4. – С. 21–29.
2. Макаревич Н. Ю., Яглов В. Н. Способы переработки техногенного отхода фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод» /

Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). С. 10–13.

3. Перспективные направления утилизации солевого шлама станции нейтрализации ОАО «Гомельский химический завод» / М.И. Кузьменков [и др.] // Нефтехимия – 2018, Минск, 27–30 ноября 2018 г.: в 2 ч. / Белорусский государственный технологический университет. – Минск: БГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 168-170.

УДК 666.22

М.В. Дяденко, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц.;
И.А. Левицкий, д-р техн. наук, проф.
(БГТУ, г. Минск)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Разработка новых составов стекол для волоконной оптики предопределяет изучение не только их оптических и технологических свойств, но и комплекса теплофизических характеристик.

Так, термическое расширение и теплоемкость определяют условия синтеза и формования оптических стекол, а также возможность изготовления на их основе жесткого оптического волокна и волоконно-оптических изделий. Корректный подбор стекол для волоконной оптики по величине термического расширения определяет качество жесткого оптического волокна и возможность его изготовления.

Теплоемкость определяет способность стекла поглощать тепловую энергию, величина которой определяется колебательным спектром. Для стекол волоконной оптики величина теплоемкости определяет тепловую инерцию и скорость выравнивания температуры по толщине волоконно-оптического элемента в процессе его изготовления и, как результат, его термическую однородность, от которой зависит качество получаемого волоконно-оптического изделия.

К стеклам для оболочек жесткого оптического волокна предъявляется ряд требований: химическая совместимость между собой и со стеклом световедущей жилы; требуемая величина показателя преломления, обеспечивающая апертуру волокна не менее 1,0; согласованность стекол оболочек и световедущей жилы по термическому расширению и вязкостным характеристикам [1].

Согласованность стекол оптического волокна по величине температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) обеспечивает его термомеханическую прочность.

Целью настоящей работы является разработка составов оптических стекол типа кроны с величиной ТКЛР $(75 \pm 3) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ для светоотражающей оболочки и $(80 \pm 3) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ для защитной оболочки.

В связи с этим синтез опытных стекол в промышленных условиях осуществлялся на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ при следующем содержании компонентов, мол. %: 42,5–50,0 SiO_2 , 37,5–45,0 B_2O_3 , 12,5–17,5 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$.

Изучение ТКЛР опытных стекол осуществлялось dilatометрическим методом, по результатам которого установлено, что данный показатель находится в пределах $(70-85) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

На рисунке 1 представлено влияние суммарного содержания $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (далее – R_2O), вводимого взамен оксида бора в количестве от 12,5 до 17,5 мол. %, на величину ТКЛР.

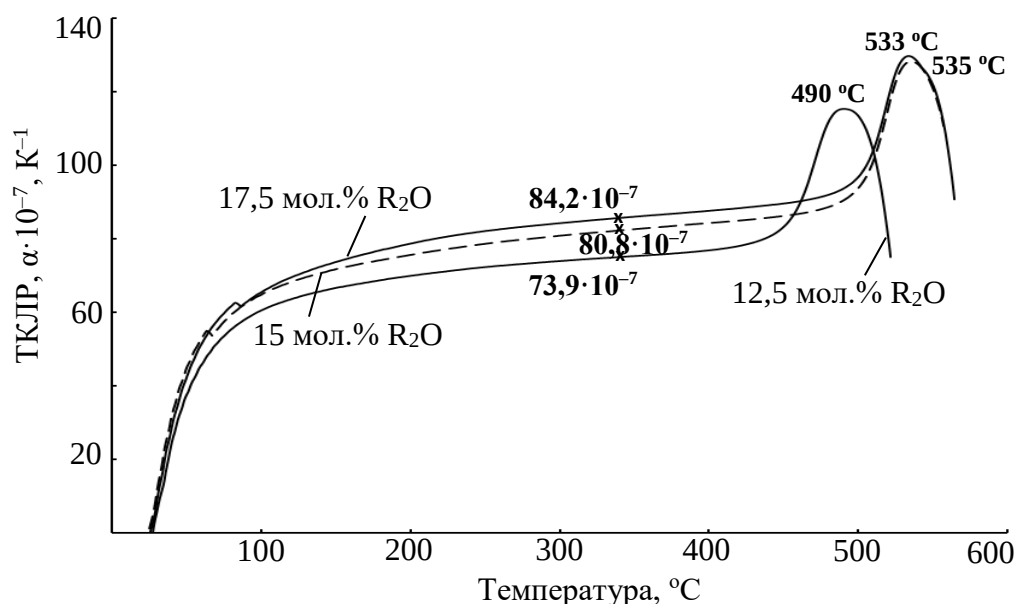


Рисунок 1 – Влияние R_2O на величину ТКЛР опытных стекол

Как следует из рисунка 1, с ростом содержания оксидов щелочных металлов, вводимых взамен B_2O_3 , ТКЛР опытных стекол повышается за счет заполнения структурных пустот катионами натрия и калия, препятствуя изгибу связей, ответственному за низкую величину термического расширения.

На рисунке 2 представлено влияние R_2O , вводимого взамен оксида кремния в количестве от 12,5 до 17,5 мол. %, на величину ТКЛР.

Как следует из рисунка 2, с ростом содержания оксидов типа R_2O , вводимых взамен SiO_2 , ТКЛР опытных стекол повышается, при этом более значительно, чем в предыдущем случае.

В соответствии с асимметричностью кривой потенциальной энергии Кондона–Морзе [2] с ростом температуры среднее межатом-

ное расстояние увеличивается. Степень асимметрии зависит от прочности химической связи и от соотношения мостиковых и немостиковых атомов кислорода. Вышеуказанная эквимольная замена R_2O на SiO_2 обуславливает преобразование мостиковых атомов кислорода в немостиковые, вызывая увеличение асимметрии связи с соседним атомом кремния [2]. В результате роста доли немостиковых атомов кислорода, усиливающих асимметрию связи $Si-O$, а также заполнения структурных пустот оксидами-модификаторами, препятствующих изгибу связей, ответственному за низкую величину ТКЛР, наблюдается повышение величины термического расширения опытных стекол.

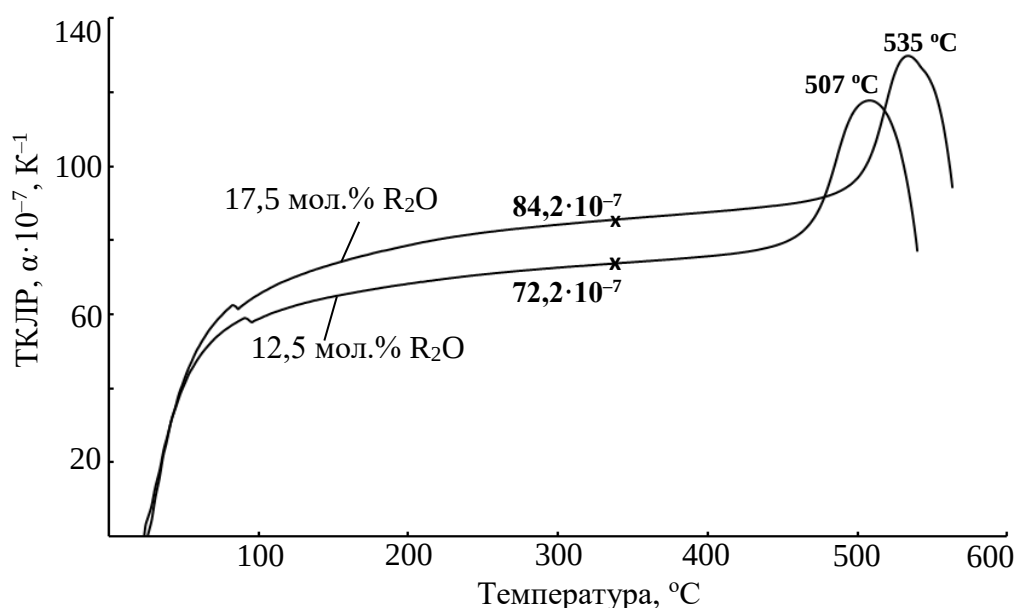


Рисунок 2 – Влияние R_2O на величину ТКЛР опытных стекол

В результате проведенного исследования требуемые показатели ТКЛР для стекла светоотражающей оболочки достигаются при содержании 50–52 мол. % SiO_2 и соотношении B_2O_3/R_2O , составляющем 3,0–3,1. Для стекла защитной оболочки данное соотношение должно составлять 2,7–2,8, а содержание SiO_2 – 42–44 мол. %.

Теплоемкость характеризует способность материала поглощать энергию, которая определяется колебательным спектром химических связей. Для стекол волоконной оптики эти показатели играют значительную роль в процессе вытягивания одно- и многожильного оптического волокна, так как именно их величина будет определять скорость выравнивания температуры по сечению волокна (рисунок 2).

В настоящей работе изучено влияние оксидов типа R_2O , вводимых взамен оксида бора в количестве от 12,5 до 17,5 мол. %.

Установлено, что изменение теплоемкости происходит в соответствии с параболическим характером. С ростом содержания R_2O от

12,5 до 15,0 мол. % наблюдается рост теплоемкости при 50 °С от 0,87 до 0,95 Дж/г·К, что вызвано, очевидно, полимеризацией кремнекислородного каркаса стекла за счет формирования комплексов $[\text{BO}_4]\text{R}^+$. В результате этого введение ионов щелочных металлов не приводит к структурным разрывам, а способствует образованию трехмерноразвитого борокремнекислородного каркаса стекла.

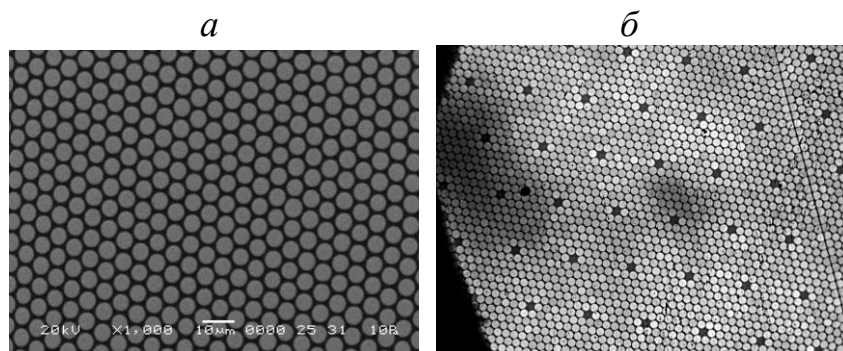


Рисунок 3 – Внешний вид оптического волокна, полученного методом двойного тигля (а) и штабиковым методом (б)

Теплоемкость твердых стеклообразных полимеров представлена как колебаниями основного структурного каркаса стекла, так и связей типа $\text{Si}-\text{O}-\text{Me}$ (где Me – ионы R^+ , R^{2+}). При этом колебания структурного каркаса являются низкочастотными, акустическими и вносят основной вклад в величину теплоемкости. Поэтому чем выше доля ковалентносвязанных структурных единиц, тем больше требуется тепловой энергии для повышения их колебаний.

Последующие добавки R_2O в количестве до 17,5 мол. % вызывает уменьшение теплоемкости от 0,95 до 0,82 Дж/г·К. По-видимому, с последующим введением R_2O ионы R^+ заполняют октаэдрические пустоты между кислородными атомами и связывают их электростатическими силами, вызывая общее ослабление структурного каркаса стекла.

Величина теплопроводности в данном случае отражает способность стекла проводить тепло в градиентном температурном поле.

Для стекол, в составе которых присутствуют два стеклообразователя, зависимость теплопроводности от химического состава выражается нелинейной функцией, зависящей от распределения оксидов-стеклообразователей в структуре стекла.

Проведено изучение коэффициента теплопроводности опытных боросиликатных стекол в интервале температур от 50 до 500 °С, по результатам которого установлено, что данный показатель изменяется в пределах 0,70–0,95 Вт/м·К. При этом температурная зависимость коэффициента теплопроводности имеет параболический характер, что обусловлено следующим.

Теплопроводность стекол возрастает с увеличением длины свободного пробега фононов вследствие повышения степени связности структурного каркаса стекла. Иначе говоря, наличие структурных разрывов вызывает рассеяние фононов и, как результат, снижение теплопроводности стекол.

Снижение теплопроводности боросиликатных стекол, используемых для оболочек оптического волокна, наряду с несогласованностью по величине теплоемкости со стеклом световедущей жилы является причиной производственного брака при получении многожильного и мультимногожильного оптического волокна и волоконно-оптических изделий на их основе – отсутствия вакуумплотности готового изделия и нарушения геометрии отдельных световодов (рисунок 4).

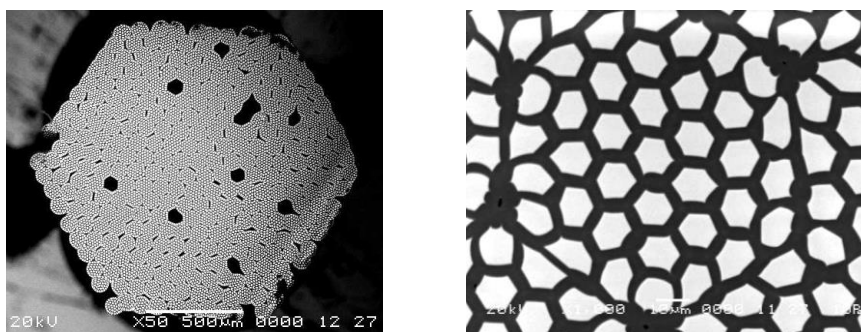


Рисунок 4 – Нарушение геометрии световодов в многожильном оптическом волокне

Изучение структуры опытных боросиликатных стекол методом ИК-спектроскопии подтвердило обоснованность выводов, полученных при изучении теплофизических характеристик.

Проведенные исследования позволили установить, что для получения многожильного оптического волокна и волоконно-оптических изделий на его основе с требуемой геометрией светоотражающую и защитную оболочки следует получать на основе боросиликатных составов с молярным соотношением B_2O_3/R_2O , составляющим 2,7–3,1, и включающих 42–52 мол.% SiO_2 .

*Исследования выполнены при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 2.1.04 (НИР 5)
ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» подпрограммы «Химические технологии, процессы и реагенты».*

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов [и др.]. – СПб: Политехника, 2004. – 679 с.
2. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. – М.: Мир, 2006. – 288 с.

И.А. Левицкий, проф., д-р техн. наук;
М.В. Дяденко, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц.;
А.А. Козловская, магистр
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Основными волоконно-оптическими элементами являются волоконно-оптические пластины, волоконно-оптические жгуты, фоконы, твистеры («поворотники»).

Волоконно-оптические пластины применяются в качестве входных и выходных окон электронно-оптических преобразователей, в качестве экранов электронно-лучевых трубок и в других системах.

Волоконно-оптические жгуты предназначены для передачи света в видимой области спектра, а также в осветительных устройствах холодного света.

Конические волоконные световоды (фоконы) служат для увеличения или уменьшения оптического изображения при его передаче.

Твистер представляет собой волоконно-оптический элемент, применяемый для поворота изображения на 180° .

Волоконно-оптические элементы и изделия изготавливаются на основе одножильных волокон, включающих световедущую жилу из стекла, характеризующегося высоким показателем преломления, а также светоотражающую оболочку из оптического стекла с меньшим показателем преломления и защитную оболочку, получаемую из окрашенного стекла.

Разница квадратов показателей преломления световедущей жилы и светоотражающей оболочки для исследованных стекол составляет 1,020–1,034. Показатель преломления стекла защитной оболочки не регламентируется.

Кроме значений показателей преломления стекол световедущей жилы и светоотражающей оболочки, светопропускания и спектральных характеристик, стекла должны соответствовать ряду требований, включающих также геометрию жилы и оболочек. К основным требованиям относятся химическая совместимость стекол, соотношение температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР), а также температурной вязкости в области формирования одножильного волокна.

Стабильность процесса вытягивания одножильного волокна должна обеспечиваться согласованностью вязкости стекол светове-

дущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек в интервале температур 600–1100 °С.

Выполненными методом электронной и оптической микроскопии при исследованиях одножильных волокон установлено наличие шероховатостей поверхности световедущей жилы, размеры которых сопоставимы с длиной световой волны.

Кроме того, поверхность волокна, вследствие электростатичности, способна притягивать микрочастицы из окружающей среды при недостаточной чистоте производственных помещений. Эта дефектность приводит к рассеянию энергии световой волны, проникающей за поверхность волокна.

Наличие молекул воды, а также примесных ионов, которые могут попадать в состав стекла с сырьевыми компонентами, также являются причиной, приводящей к потере пропускания света в оптических волоконных элементах.

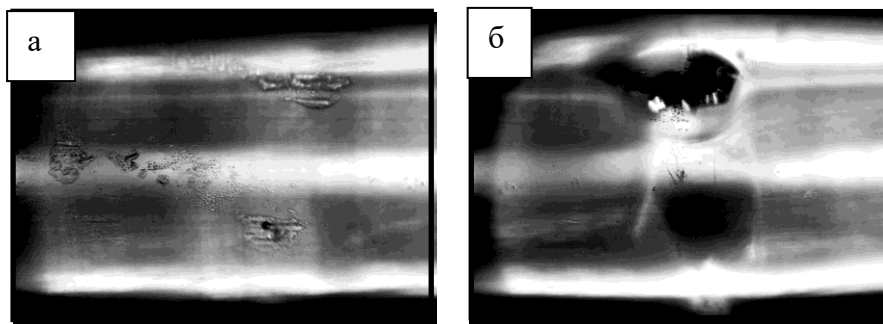
Кроме того, при этом не должно возникать неоднородностей, вызванных процессами фазового разделения на границе стекол световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек, исключая потери энергии световой волны.

Важным фактором является также устранение обрывов волокон на стадии их формования, которые могут происходить в следствие несогласования вязкости стекол, а также термической и химической неоднородности стекломассы. Сквозняки, промышленная вентиляция и конвекция также могут стать причинами этого.

В производстве ОАО «Завод «Оптик» толщина световедущей жилы составляет 60 ± 1 мкм, светоотражающей оболочки – 32 ± 1 мкм и защитной оболочки – 28 ± 1 мкм.

При изготовлении одножильного волокна в условиях ОАО «Завод «Оптик» наблюдаются указанные выше дефекты, общее количество которых составляло до 7–16 %, устанавливаемого сплошным контролем с помощью оптического микроскопа. Наиболее распространенным дефектом является несоответствие геометрии оболочек волокна и их толщин, составляющее 6–8 %. Наличие неоднородностей в виде воздушных включений, ликвационной и кристаллизационных образований составляет менее 1 до 4 %. Обрыв волокон находится в интервале 1–3 %. В числе прочих видов дефектов наблюдается поперечная невыравненность световедущей жилы и светоотражающей оболочки, несовпадение осей волокон. Они присутствуют в небольшом количестве, составляющем не более 1 %.

Оптический снимок одножильного волокна в продольном направлении, имеющего дефекты, представлен на рис.1.



а – наличие кристаллизации;
 б – несоответствие размеров и наличие воздушных включений
Рисунок 1 – Продольное изображение единичного световода с дефектами (×50)

Анализ качества многожильных световодов, полученных перетяжкой пакета одножильных, которая производилась при температуре пластической деформации стекла, составляющей от 600 ± 5 до 700 ± 5 °С, также показывает возможность их дефектности. Чаще всего встречаются неоднородности, вызванные наличием воздушных включений (2–4 %) и дефектных волокон (2–4 %), а также не обеспечивающие требуемую геометрию (5–7 %).

Наиболее часто наблюдается также деформация волокон в многожильном волокне вследствие деформации одножильных световодов, которая происходит на границе пакетов в 1–5 рядах единичных волокон после их термического формирования.

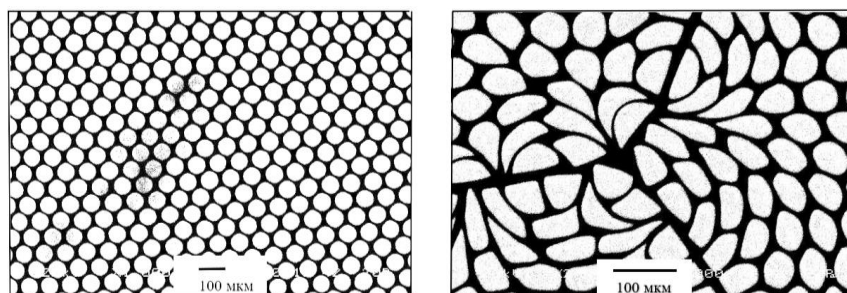
Как известно [1–3], даже небольшие отклонения от идеально правильной геометрической формы волокна приводят к резкому снижению количества лучей, способных проходить вдоль волокна на его выходной конец.

Электронно-микроскопические снимки пакетов многожильных волокон представлены на рис. 2.

Причинами данного дефекта является повышенная вязкость стекла защитной оболочки, вызывающая дефектность единичных волокон в пакете.

Установлено, что значения температурной вязкости стекол защитной оболочки при значениях $\lg \eta = 8–9$ должны быть ниже светотражающей оболочки и эта разница должна находиться в интервале 15–25 °С.

Недостаточная вакуумная плотность пакетов многожильных волокон и наличие посторонних включений, а также другие дефекты является причиной снижения светопропускания волоконно-оптических элементов (рис. 3). Выход годной продукции на действующем производстве ОАО «Завод «Оптик» составляет 58–63 %.



1 – качественная укладка пакета;

2 – нарушение геометрии волокон на границе укладки

**Рисунок 2 – Электронно-микроскопический снимок пакетов из
многожильных волокон**

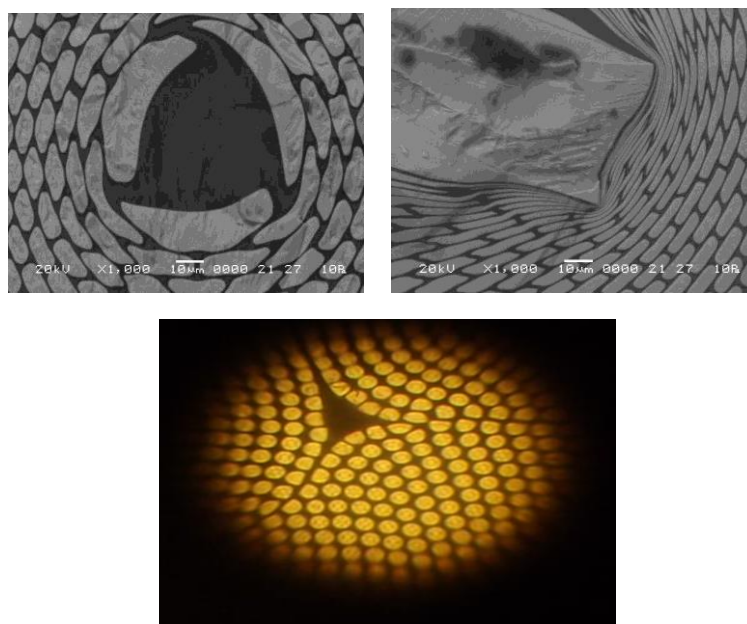


Рисунок 3 – Дефекты волоконно-оптических изделий

Одним из методов контроля качества волоконно-оптических элементов является определение их светопропускания. Светопропускание в видимой части спектра качественных образцов элементов и изделий лежит в интервале 61–80 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейли, Д. Волоконная оптика. Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт. – М.: КУДИЦ – ОБРАЗ. – 2006. – 320 с.
2. Стерлинг, Д. Дж., младший. Техническое руководство по волоконной оптике / Д. Дж. Стерлинг, младший. – М.: ЛОРИ, 1988. – 288 с.
3. Оптические волокна и волоконные элементы: Сб. статей и переводов под ред. Блоха К.И., Соскиной Г.А. – М.: Химия. – 1972. – 264 с.

СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПРОПАНТЫ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Пропанты – высокопрочные гранулированные материалы (расклинивающие агенты), используемые в технологии гидроразрыва нефтегазоносного пласта (ГРП) для закачки в скважины совместно с жидкой фазой [1].

В 2023 г. общемировая потребность в пропантах составила 157 млн. т. В Республике Беларусь потребление пропантов ежегодно растет и в 2023 г. составило около 60 тыс. т. Рост потребления пропантов в Республике Беларусь связан с тем, что большинство месторождений является труднодоступными.

Определяющими возможность использования материала в качестве пропанта свойствами являются сферичность, округлость, плотность, механическая прочность и кислотостойкость [2]. Перспективным материалом для получения пропантов является стеклокерамика, синтезированная в области кристаллизации диопсида в системе CaO-MgO-SiO_2 . Диопсид относится к пироксенам – цепочечным силикатам. Особенностью пироксенов является образование ряда непрерывных твердых растворов.

В составах стекол варьировалось содержание SiO_2 , MgO , CaO и R_2O . Синтез стекол проводился в газовой пламенной печи при температуре 1480 ± 10 °C с выдержкой при максимальной температуре в течение часа. Все стекла хорошо проварены, без дефектов, окрашены в черный цвет из-за наличия в составах оксида железа.

Изучена кристаллизационная способность синтезированных стекол. Все стекла кристаллизуются в интервале температур 800–950 °C. С выделением пироксенового твердого раствора авгита. В стеклах с повышенным содержанием оксидов щелочных металлов выделяется побочная кристаллическая фаза нефелина, ухудшающего эксплуатационные характеристики материала. Введение оксидов щелочных металлов обусловлено необходимостью регулирования вязкостных характеристик расплава для возможности использования метода центробежного формования.

Существенное влияние на прочность материалов оказывает их структура. В пироксеновых твердых растворах при протекании изоморфных замещений происходит увеличение количества связей и из-

менение их длин за счет встраивания в кристаллическую решетку новых элементов.

Существенное влияние на механическую прочность и химическую устойчивость будет оказывать остаточная стеклофаза, характеризующаяся меньшими показателями прочности и химической устойчивостью по сравнению с кристаллической, в результате чего разрушение стеклокерамических пропантов будет происходить по остаточной стеклофазе. За счет того, что щелочные оксиды, снижающие механическую прочность и химическую устойчивость, встраиваются в кристаллическую решетку, остаточная стеклофаза обедняется данными оксидами, что будет способствовать повышению ее механической прочности и химической устойчивости.

Изучена механическая прочность синтезированной стеклокерамики. Кристаллизация проводилась при температурах 800–900 °С с шагом 50 °С в течение 10, 30 и 60 мин.

При увеличении температуры кристаллизации с 800 до 850 °С происходит резкий рост механической прочности стеклокерамики с 200–300 до 400–550 МПа, что обусловлено активным выделением пироксенового твердого раствора авгита при данной температуре. При дальнейшем повышении температуры кристаллизации механическая прочность возрастает незначительно, что обусловлено практически полным завершением процесса кристаллизации при 850 °С. Оптимальным временем кристаллизации является 30 мин.

Наибольшей механической прочностью характеризуются стеклокерамические материалы, содержащие повышенное количество оксида магния. Однако увеличение содержания оксида магния в составе может приводить к кристаллизации побочной фазы нефелина, который активно кристаллизуется в присутствии не связанного MgO.

Влияние химического состава, температуры и времени кристаллизации на химическую устойчивость аналогично механической прочности. Однако требованиям, предъявляемым к пропантам соответствуют только составы, с минимальным содержанием SiO₂ и максимальным содержанием MgO. Существенным преимуществом пироксенов является возможность использовать сырьевые материалы, залегающие на территории Республики Беларусь в значительных количествах: базальты, граниты, гранодиориты и др. Наиболее перспективным сырьевым материалом для получения стеклокерамических пропантов являются гранитоидные отсеvy, образуемые при дроблении гранитного щебня на Микашевическом месторождении, разрабатываемом РУПП «Гранит». Ежегодно на предприятии добывается более 21 млн. т гранитного щебня, при этом на каждую тонну товарного

щебня приходится 0,6–0,7 т отходов, в том числе отсевов дробления породы. Сегодня выход отходов на РУПП «Гранит» превышает 20 % от объема товарного продукта. Преобладающими породами Микашевского месторождения являются граниты, гранодиориты, диориты и их жильные разновидностями: диоритовые порфириты, аплиты, пегматиты и др. Среди основных пород преобладают мелко- и тонкозернистые метадиабазы, среднезернистые метагаббро-диабазы, изредка встречаются метагабброиды. Гранитоидные отсеивы получают в результате многочисленного дробления породы, благодаря чему они имеют незначительные колебания химического состава.

Синтезированные на основе гранитоидных отсеивов стеклокерамические материалы характеризуются механической прочностью при сжатии 400–550 МПа, химической устойчивостью к воздействию 15 % HCl более 99 %, растворимостью в смеси кислот HF и HCl 7–10 %, плотностью 1600–1700 кг/м³.

Формование стеклокерамических пропантов осуществлялось методом диспергирования расплава на капли, заключающегося в подаче расплава через фильеру на вращающееся зубчатое колесо, которое разрезает струю расплава на капли, которые во время полета приобретают сферическую форму за счет сил поверхностного натяжения, охлаждаются и направляются на направленную объемную кристаллизацию при температуре 850 °С в течение 30 мин.

Синтезированные стеклокерамические пропанты характеризуются сферичностью и округлостью – 0,97 усл. ед., сопротивлением раздавливанию при нагрузке в 51,7 МПа – 0,3 % разрушенных гранул, насыпной плотностью – 1680 кг/м³, растворимостью в 15 % HCl – 0,8 %, растворимостью в смеси кислот HF и HCl – 7,8 %.

Разработанные пропанты по уровню свойств соответствуют дорогостоящим алюмосиликатным пропантам с высоким содержанием корунда, однако благодаря использованию дешевого недефицитного сырья характеризуются значительно меньшей себестоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силин, М. А. Промысловая химия: Учебное пособие / М. А. Силин [и др.]. – М., 2016. – 350 с.
2. Арбузов, В. Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Ч. 1 / В. Н. Арбузов Томск: Из-во Томского политехнического института, 2011. – 200 с.

А.Ф. Минаковский, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск);

Д.Б. Холикулов, зам. директора, д-р техн. наук;

Б.Э. Ниязметов, ст. преп.; М.Б. Хамдамов, студ.
(ТГТУ АФ, г. Алмалык, Узбекистан)

ИЗУЧЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КАЛЬМАКИР» АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГМК»

АО «Алмалыкский ГМК» планирует в 2020-2028 годах довести производство меди до 400 тыс. т. Согласно документу [1], проект расширения производства цветных металлов на АО «Алмалыкский ГМК» разделен на два этапа. В 2020-2025 гг. на комбинате планируется разработка открытого карьера на месторождении «Ёшлик-I», а также строительство медно-обоганительной фабрики (МОФ) мощностью переработки 60 млн. т руды в год. Фабрику такой мощности планируется построить на АО «Алмалыкский ГМК», для чего были изучены аналогичные производства на медных месторождениях Чили и Перу [2].

Медные руды, как правило, являются комплексными, в них помимо минералов меди, присутствуют минералы железа, цинка, свинца, молибдена. Кроме того, медные руды содержат золото, серебро, селен, теллур, рений, кадмий, индий, кобальт, никель, галлий, таллий, серу и др. При геолого-промышленной оценке месторождений и расчете кондиций вместе с медью учитывается количество извлекаемых попутных компонентов (сера, молибден, золото, серебро и др.).

Цель исследований – получение необходимой информации о свойстве окисленной медной руды месторождения «Кальмакир». При опробовании отбирали пробы руды массой 1 т.

Для разработки схемы производства необходимо [3, 4]: проверить указанную в паспорте массу исходной пробы и размер наибольших кусков руды; рассчитать, соответствует ли начальная масса пробы допустимой минимальной массе; выбрать коэффициент к формуле для расчета минимальной массы порций руды, получаемых при сокращении пробы; установить, какие анализы потребуются для изучения вещественного состава руды, сколько для этого ее понадобится и какой крупности.

В целях выбора рациональной технологии переработки забалансовых окисленных руд месторождения «Кальмакир» в работе изучены их химический, минералогический, гранулометрический составы, распределение основных ценных компонентов (Cu, Au, Ag) по классу

крупности, а также измельчаемость руды в зависимости от продолжительности процесса (рис. 1).



Рисунок 1 – Образцы минералов окисленных медных руд

По данным [5-7], установлено, что химический состав проб забалансовой окисленной руды месторождения «Кальмакир» на 85% представлен литофильными компонентами. Основным из них является кремнезем, на долю которого приходится 65,14% мас. Доля глинозема находится на уровне 11,44% мас.

Суммарное количество щелочных и щелочноземельных металлов составляет 4,25% мас. Содержание карбонатов в пересчете на диоксид углерода составляет 0,44% мас.

Проба сырья методом квартования отбиралась для проведения химического и ситового анализа. Результаты ситового анализа представлены в табл. 1.

Процесс отбора пробы включает перемешивание, сокращение и дробление в замкнутом цикле с грохочением. Основной особенностью подготовки лабораторных проб является соблюдение мер по сохранению их гранулометрического состава (табл. 2.).

**Таблица 1 – Результаты ситового анализа технологической пробы отвала
№ 39 окисленной медной руды**

№	Класс крупности, мм	Выход		Суммарный выход, %	
		гр	%	По «плюсу»	По «минусу»
1	+2	256,5	25,65	25,65	100,00
2	-2+1	233,8	23,38	49,03	74,35
3	-1+0,63	161,2	16,12	65,15	50,97
4	-0,63+0,45	14,0	1,40	66,55	34,85
5	-0,45+0,25	63,2	6,32	72,87	33,45
6	-0,25+0,1	30,4	3,04	75,91	27,13
7	-0,1+0,074	33,8	3,38	79,29	24,09
8	-0,074+0	207,1	20,71	100,00	20,71

**Таблица 2 – Результаты гранулометрического состава и распределение
основных компонентов**

Класс круп- ности, мм	Выход		Содержание, %				Извлечение, %			
	%	кг	Cu	Mo	Au, г/т	Ag, г/т	Cu	Mo	Au	Ag
2	25,65	100	0,91	0,0062	0,77	3,18	23,41	19,88	15,80	19,19
-1	23,38	74,35	0,88	0,0044	0,88	3,38	20,64	12,86	16,46	18,59
0,63	16,12	50,97	0,81	0,0094	0,91	3,36	13,10	18,94	11,67	12,74
0,45	1,4	34,85	0,95	0,0063	0,83	4,56	1,33	1,10	0,93	1,50
0,25	6,32	33,45	0,93	0,0102	1,00	3,44	5,90	8,06	5,06	5,12
0,1	3,04	27,13	0,73	0,0083	1,12	4,64	2,23	3,14	2,72	3,32
0,074	3,38	24,09	1,15	0,0093	1,83	5,91	3,90	3,93	4,95	4,70
-0,074	20,71	20,71	1,42	0,0124	2,56	7,15	29,50	32,10	42,41	34,84
Итого	100	-	0,997	0,008	1,25	4,25	100,0	100,0	100,0	100,0

Плотность окисленной медной руды – 2,68 г/см³. Результаты гранулометрического состава показали, что медь находится на классах крупности +1-1 мм и -0,074 мм.

Гранулометрический состав окисленных медных руд месторождений Кальмакир АО «Алмалыкский ГМК», используют для оценки результатов процесса обогащения и учитывают при выборе типа и параметров технологического оборудования на обогатительных фабриках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Президента Республики Узбекистан. № ПП-4731 О дополнительных мерах по расширению производства цветных и драгоценных металлов на базе месторождений АО «Алмалыкский ГМК». г. Ташкент, 26 мая 2020 г.

2. АГМК намерен довести производство меди до 400 тысяч тонн

Режим доступа: <https://www.gazeta.uz/ru/2020/05/30/agmk/> Дата доступа 20.01.2025

3. Подготовка лабораторных технологических проб руд к исследованиям Режим доступа: <https://fccland.ru/issledovanie-poleznyh-iskopaemyh/11068-podgotovka-laboratornyh-tehnologicheskikh-prob-rud-k-issledovaniyam.html> Дата доступа 20.01.2025

4. Рябкин В. К. Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского». Москва, 2014. – 29 с.

5. Исроилов А.Т., Ходжаев А.Р., Ниязметов Б.Е., Холикулов Д.Б. Обогащение забалансовых медных руд месторождения «Кальмакир» АО «Алмалыкский ГМК» // Материалы междунар. науч.-практической. конф. «Современные проблемы и инновационные технологии решения вопросов переработки техногенных месторождений Алмалыкского ГМК», г. Алмалык, 18–19 апреля 2019 г. – С. 58–60.

6. Холикулов Д.Б., Бекбутаев А.Н., Ниязметов Б.Е., Нормуратов Р.И. Переработка окисленных медных руд месторождения Кальмакир. Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». – Екатеринбург: УрО РАН, 2021 – 420 с. С. 132–135.

7. Холикулов Д.Б., Ниязметов Б.Е., Бекбутаев А.Н., Гайратов Б.Г. Исследование по извлечению меди из окисленных руд АО «Алмалыкский ГМК» агитационным серноокислотным выщелачиванием. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Холикулов Д.Б. [и др.]. 2022. 1(94). С. 46–51.

УДК 669.536

Д.Б. Холикулов, зам. директора, д-р техн. наук
(ТГТУ АФ, г. Алмалык, Узбекистан);

У. Музаффаров, докторант (НГГиТУ, г. Навои, Узбекистан);

А.Ф. Минаковский, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ МЕДНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «АЛМАЛЫКСКИЙ ГМК»

Проблема переработки и рационального использования природных ресурсов тесно связана с эффективностью промышленного производства, охраной окружающей среды и новыми разработками в области утилизации промышленных отходов. В производстве металлов

образуется огромное количество жидких и твердых отходов. Проблема их переработки существенно актуализируется в связи с уменьшением возможности их складирования. Утилизация этих отходов является важной задачей для предотвращения загрязнения окружающей среды. В результате анализа существующего положения выработана концепция, которая позволяет в значительной степени повысить эффективность переработки отходов. Процесс озонирования является перспективным методом для переработки технологических растворов и промывных вод, содержащих металлы [1–4].

Металлургические отходы могут содержать различные тяжелые металлы, химические соединения и другие вредные вещества, поэтому их утилизация требует особого внимания. Современные технологии для утилизации отходов позволяют снизить вредное воздействие на окружающую среду, а также получить ценные ресурсы [5–6].

При производстве меди образуются различные технологические растворы (рис. 1), которые после обезвреживания отправляются на хвостохранилище.

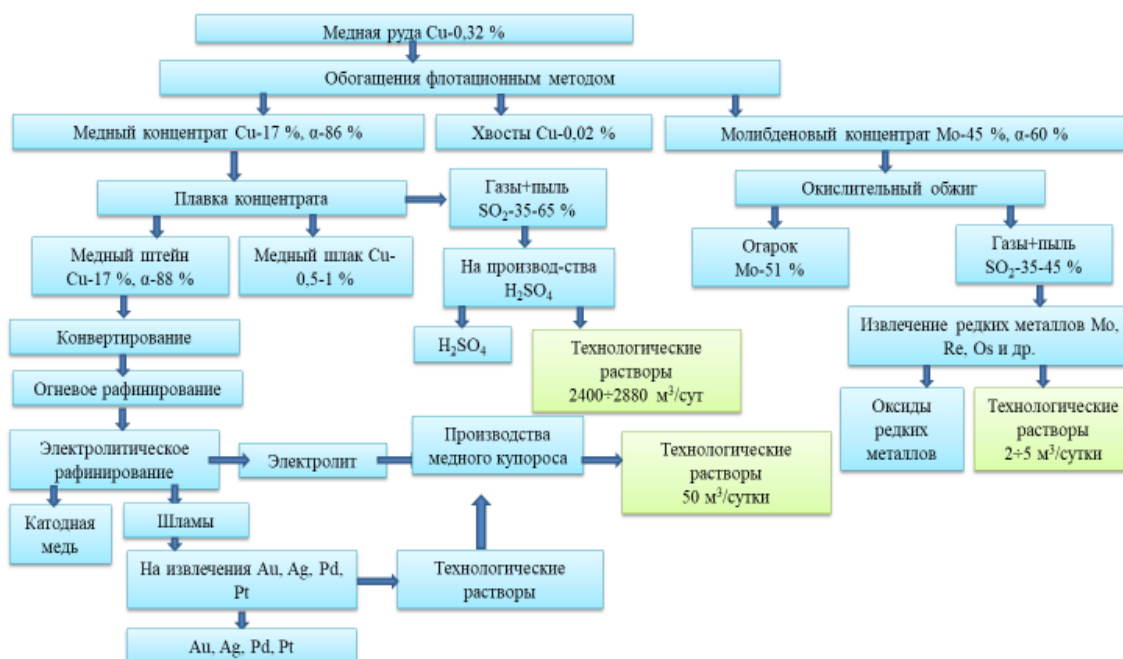


Рисунок 1 – Принципиальная схема образования технологических растворов при производстве меди

При нейтрализации технологических растворов теряются ценные металлы [7–8]. Кроме этого, растворы могут содержать соединения металлов, присутствующих в технологических процессах, и оказывать существенное воздействие на окружающую среду. Даже в незначительных концентрациях некоторые металлы, такие как ртуть или кадмий, очень токсичны.

Объектом исследования служили технологические растворы медного производства: кислые стоки купоросного цеха, промывные растворы серноокислотного цеха Медеплавильного завода АО «Алмалыкский ГМК» и растворы, полученные при серноокислотном выщелачивании окисленных медных руд. Объем технологических растворов: кислые стоки – 50 м³/сутки; промывной раствор - 2400÷280 м³/сутки; серноокислотные растворы – 20÷25 м³/сутки. Из результатов химического анализа (табл. 1) видно, что промышленный интерес для извлечения металлов представляют медь, цинк, железо, никель и молибден. Сложность переработки промывного раствора связана с высоким содержанием кислоты.

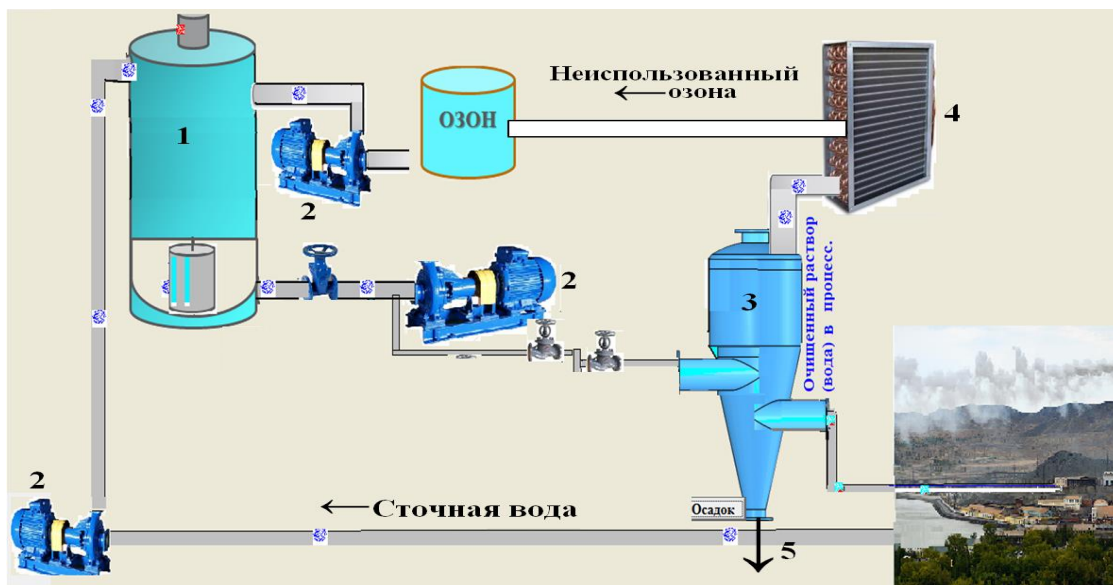
Таблица 1 – Результаты химического анализа технологических растворов медного производств

Химический состав, г/дм ³							
H ₂ SO ₄	Cu	Zn	Fe	Ni	Mo	S	Al
Кислые стоки купоросного цеха МПЗ							
4	0,035	0,001	0,02	12,5	0,002	0,001	0,0001
Промывной раствор СКЦ МПЗ							
48	0,026	0,012	0,019	0,002	0,0012	0,03	0,0003
Растворы, полученные при серноокислотном выщелачивании окисленных медных руд							
5	1,9	0,01	0,0041	-	0,00027	0,023	0,0002

Принципиальная технологическая схема полупромышленных испытаний очистки технологических растворов медного производства, приведена на рис. 2. В качестве реактора (установки) применялась барботажная колонна высотой 1 м. Реактор оборудован мелкопористым фильтром с диаметром отверстий 70...100 мкм для диспергирования озono-воздушной смеси, отвода отработанного газа и периодического отбора проб очищенной воды. Реактор работал в проточном режиме непроточном по жидкой фазе. Для экспериментальных исследований, был выбран и изготовлен барботажный абсорбер.

Технологический раствор поступает в смеситель 1, в котором он смешивается с реагентами для получения требуемого значения pH, и далее насосом 2 подается в барботажный абсорбер 3. Озоно-воздушная смесь реагирует с водой в барботажном абсорбере, и происходит процесс озонирования. Отработанные газы из абсорбера направляются в аппарат 4 для сбора неиспользованного озона. Для увеличения эффективности процесса неиспользованный озон обратно подается к началу процесса для предотвращения сброса в атмосферу. Очищенный технологический раствор обратно отправляется на производство. Поскольку озон является сильным отравляющим веществом, на установках озонирования предусматривается стадия очистки отхо-

дящих газов от остатков озона, т. е. неиспользованный озон обратно отправляется на барботажный абсорбер 3.



1 – смеситель; 2 – насос; 3 – барботажный абсорбер;
4 – аппарат для сбора отходящих газов и неиспользованного озона; 5 – осадок

Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема установки очистки технологических растворов методом озонирования

В результате проведенных исследований определено степень очистки технологических растворов зависит от значения рН раствора, при котором достигается практически полное осаждение ионов металлов в виде осадок. Сернокислые соединения металлов разлагается на ионы металлов и кислотные остатки, ионы металлов взаимодействует с гидроксид-ионом OH^- и образуется осадки металлов.

Озонирование может быть использован для удаления из технологических растворов солей ряд тяжёлых металлов: сульфаты, карбонаты металлов и др. Установлено, что за 1 часов обработки концентрации металлов (Fe, Zn, Cu) уменьшилась до уровня $<0,01$ мг/л, что на порядок ниже ПДК металлов в воде, а также снижает экологический ущерб окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холикулов Д.Б., Нормуротов Р.И., Болтаев О.Н. Новый подход к решению проблемы очистки сточных вод медного производства // Горный вестник Узбекистана. 2019 № 3 (78), – С. 92-96.
2. Холикулов Д. Б., Нормуротов Р. И. Исследования по очистке сточных вод медного и цинкового производства озоном // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – №. 1. – С. 90-95.
3. В.Ю. Бажин Отходы металлургического производства как альтернативный минерально-сырьевой ресурс. Режим доступа:

https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/25942/1/mltm_2014_17.pdf Дата доступа 20.01.2025.

4. Современные технологии для утилизации отходов металлургического производства. Режим доступа: <https://www.kvarto.ru/3003-2/> Дата доступа 15.01.2025.

5. Медяник Н.Л., Варламова И.А., Калугина Н.Л., Строкань А.М. Прогнозирование флотационной активности реагентов для извлечения цинка и меди (II) по квантово-химическим дескрипторам // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2011. № 3. –С. 83-89.

6. Chirkst D.E., Lobacheva O.L., Berlinskii I.V., Sulimova M.A. The thermodynamic properties of hydroxo compounds and the mechanism of ion flotation for cerium, europium, and yttrium // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2009. – №83 (12). –Рр. 2022-2027

7. Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А. Изучение возможности селективного извлечения меди методом известкования из сточных вод горных предприятий гидрометаллургического комплекса // Вестник Иркутского государственного технического университета. –2010. Т. 42. № 2. –С. 188-193.

8. Kholikulov D.B., Matkarimov S.T. Pilot tests of processing technologies of process solutions of copperproduction by ozonation. Materials Today: Proceedings, 2021, 45, стр. 4987–4992.

9. Kholikulov D. B. et al. Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production //International conference on «Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges and prospects» Navoi, Uzb. – 2019. – С. 65-68.

УДК 66.045

Nadira Yusupova, PhD of technical sciences, docent
(Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of Uzbekistan);

E-mail: nadira_87@mail.ru

Abdugaffor Khurmamatov, Doctor of technical sciences, professor
(Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of Uzbekistan);

E-mail: gafuri_19805@mail.ru

Salamat Berdimbetov, Basic doctor student
(Tashkent Institute of Chemical Technology);

E-mail: berdimbetovsalamat@mail.ru

**DEPENDENCE OF HEAT EXCHANGE EFFICIENCY DURING
CONDENSATION OF A VAPOR-GAS MIXTURE ON THE SOLID PHASE
CONCENTRATION USING THE EXAMPLE OF A MULTICOMPONENT
EXTRACTION GASOLINE MIXTURE**

Abstract: Condensation of extraction gasoline vapors with microparticles on tubes with annular grooves was studied. It was found that increasing the solid phase concentration to 3-3.5% leads to an increase in heat exchange intensity, after which it stabilizes. Experiments showed that decreasing the groove pitch ($t/D=0.25$) significantly increases the heat transfer coefficient.

Keywords: condensation, heat exchange, extraction gasoline, microparticles, annular grooves.

In the chemical industry, it is often necessary to condense vapors of extraction gasoline containing microparticles up to 100 microns in size. The existing sludge traps in the technological chain do not provide a high degree of purification and the multicomponent mixture contains up to 5-7% of particles [1].

It is well known that the presence of fine solid particles usually leads to an increase in the number of condensation nuclei, thereby intensifying the process of condensation of vapor-gas mixtures. In several studies, surfactants, inactive particles, and dust particles have been used as additional condensation nuclei to significantly intensify the condensation process [2].

The condensation process generally occurs on a surface at a temperature where the saturated vapor pressure is lower than the partial vapor pressure in the vapor-gas mixture. This process can take place on some cooled surface or within the mixture volume-on condensation nuclei, i.e., dust particles, ions, droplets, etc. Condensation always begins on the surface of some nuclei. To enhance the process efficiency, conditions are created for vapor condensation deposition on the surface of microparticles [3].

To intensify heat transfer during the condensation of a mixture of extraction gasoline, water, and oilcake particles, an experimental setup was installed, and studies were conducted on tubes with annular grooves across a wide range of operating parameters [4].

The water temperature at the inlet varied from 8 °C to 14 °C, and the velocity ranged from 0.05 to 2.5 m/s. The velocity of the vapor-gas mixture at the inlet varied in the range of $w_{\text{vgm}}=0.1\text{-}11$ m/s, corresponding to Reynolds numbers $\text{Re}_{\text{vgm}}=(0.22\text{-}20)\times 10^3$. The solid phase concentration in the vapor-gas mixture ranged from $c=0\text{-}5\%$.

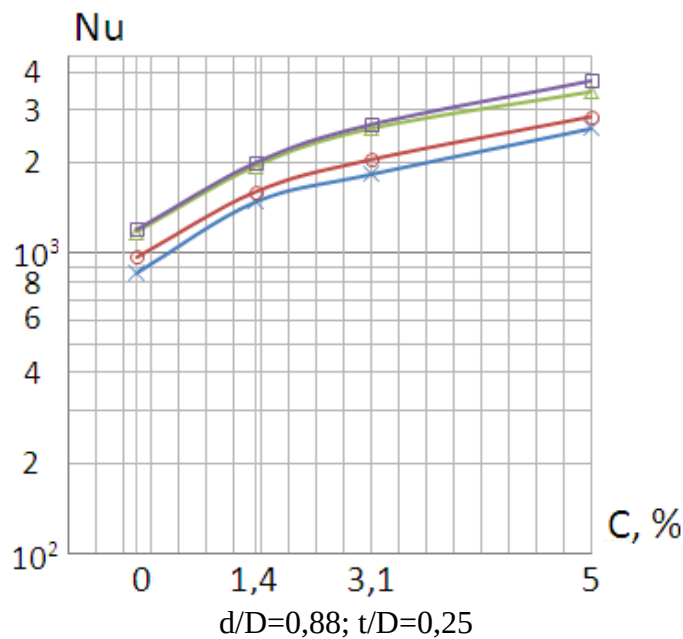
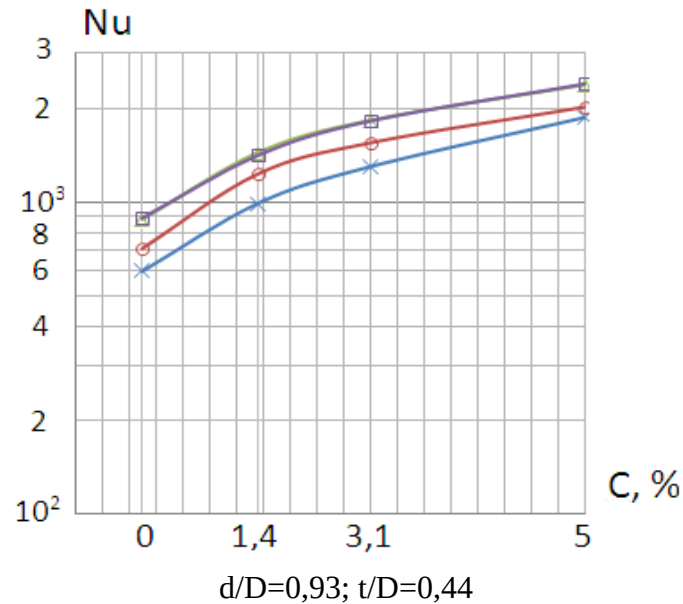


Figure – Dependence of heat exchange intensity Nu on the solid phase concentration of a multicomponent vapor-gas mixture of extraction gasoline during film condensation

$\times$ -Re = 3500; $\circ$ -Re = 7800; Δ -Re = 12000; $\square$ -Re = 20000;

The figure presents results on the film condensation of extraction gasoline vapors containing a solid phase on smooth surfaces and tubes with annular grooves as a function for various Re , d/D , and t/D values.

From the graphs, it is evident that with an increase in the concentration of oil cake particles in the mixture, an increase in heat transfer intensity is observed across the entire flow velocity range. For the tube with $d/D=0.93$ at $Re=12000$ and $c=0\%$, the heat transfer coefficient $Nu=1450$, at $c=1.4\%$, the Nusselt coefficient $Nu=1680$, at $c=3.1\%$ $Nu=1890$, and at $c=5\%$ the coefficient $Nu=1870$. A sharp increase in Nu occurs up to $c=3-3.5\%$, after which the growth slows significantly. This trend was recorded for all experimental tubes and Re values.

Comparison of the values of the functions $Nu=f(c)$ for tubes with $t/D=0.44$ and $t/D=0.25$ at relatively similar $d/D=0.93$, $Re=12000$, and $c=1.4\%$, shows that the Nu value is higher at an annular groove spacing of $t/D=0.25$. For instance, at $t/D=0.44$, $Nu=1550$, while at $t/D=0.25$, $Nu=2110$, an increase by a factor of 1.36.

Experimental studies and visual observations have shown that starting with a solid phase concentration of more than 3% in a multicomponent vapor-gas mixture, the increase in the heat transfer coefficient slightly slows down. This is likely due to the saturation factor of droplet formation centers, i.e. condensation. Notably, due to the intensified heat within the tubes, the temperature of the cooling water and the tube wall is much lower than during condensation on smooth tubes. This eliminates the adhesion of microparticles to the heat exchange surface due to the lower wall temperature.

REFERENCES

1. Belenky M.Ya. Eksperimental'noye issledovaniye teplovykh i gidravlicheskiykh kharakteristik teploobmennyykh poverkhnostey, formirovannykh sfericheskimi lunkami. / M.Ya. Belenky, M.A. Gotovsky, B.M. Lekakh // High Temperature Thermophysics. – 1991. – Vol. 29. – No. 6. – pp. 1142-1147.
2. Zhukauskas A.A. Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh. Moscow: Nauka, 1982. 472 p.
3. A.M. Khurmamatov, N.K. Yusupova. Polucheniye stroitel'nogo bituma iz neftyanykh shlamov. // Journal "Chemical Industry": – St. Petersburg, 2020. No. 2. – pp. 88-92.
4. A.M. Khurmamatov, N.K. Yusupova Rezul'taty opredeleniya fraktsionnogo sostava i fiziko-khimicheskiye svoystva neftyanykh shlamov. // Journal "Chemical Industry": – St. Petersburg, 2019, No. 1. – pp. 38-43.

Ф.Э. Умиров, проф., д-р техн. наук;
Ж.М. Шодикулов, доц., PhD;
Х.Б. Мажидов, базовый докторант
(НГГТУ г. Навои, Республика Узбекистан)

ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА КАУСТИЧЕСКОЙ СОДЫ

Сегодня рациональное использование вторичных продуктов химической промышленности становится одной из важнейших проблем в мире. В процессе получения готовой продукции на промышленных предприятиях образуется множество вторичных продуктов. Поскольку эти вещества не используются, они оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому утилизация вторичных продуктов является актуальной проблемой. Мощность комплекса каустической соды, запущенного 28 декабря 2019 г. на АО «Навоиазот», составляет 75 000 т каустической соды 32%-ной, 73 500 т каустической соды 50%-ной, 64 000 т хлористого водорода, 11 250 тонн соляной кислоты 31%, 10% производится также гипохлорит натрия [1–2].

В работе представлены результаты исследования состава вторичного продукта (шлама) цеха водоподготовки комплекса производства каустической соды АО «Навоиазот» с использованием химических и современных физико-химических методов анализа. Химический состав данного шлама включает, мас.% NaCl – 11,6; CaCO₃ – 7,3; Na₂SO₄ – 3,3; Mg(OH)₂ – 4,7 % и 38 % H₂O. Видно, что в ходе процесса преимущественно выпадают CaCO₃ и Mg(OH)₂, что свидетельствует о наличии нерастворенного NaCl и образовании Na₂SO₄. Осадок, образующийся в процессе, составляет более 110–120 кг в сутки, что требует проведения научных исследований для отделения всех веществ с целью их утилизации [2].

На следующем этапе был проведен ИК-спектроскопический анализ высушенного вторичного продукта (суспензии) на спектрометре IRTRACER-100 (Shimadzu, Япония) в диапазоне частот 400–4000 см⁻¹.

Полученные результаты представлены на рисунке 1.

ИК-спектроскопический анализ показывает, что длина волны в области 3677 см⁻¹ соответствует наличию водородных связей при 4000–2500 см⁻¹, а 3677 см⁻¹ – колебательным формам связи, характерным для молекул воды или гидроксильным (OH⁻) группам. Область двойной связи при 2000–1500 см⁻¹ показывает, что в этой области включается наличие значительного числа двойных связей в анализиру-

емом соединении. В области 1500–500 см^{-1} наблюдается пик при 1413 см^{-1} , связанный с колебаниями, характерными для карбонат-ионов ($\text{CO}_3^{(-2)}$).

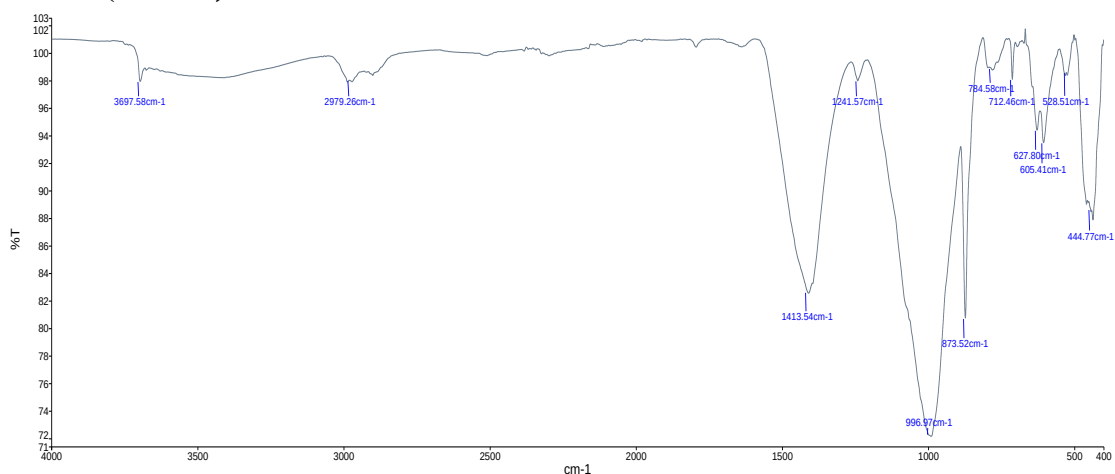


Рисунок 1 – ИК-спектр вторичного продукта (осадка) разделения каустической соды

Это указывает на присутствие карбонатной группы в соединении. Область 900–600 см^{-1} содержит несколько пиков, указывающих на наличие кислородных связей типа металл-кислород или металл-сера. Рентгеноструктурный анализ вторичного продукта (суспензии) представлен на рис. 2.

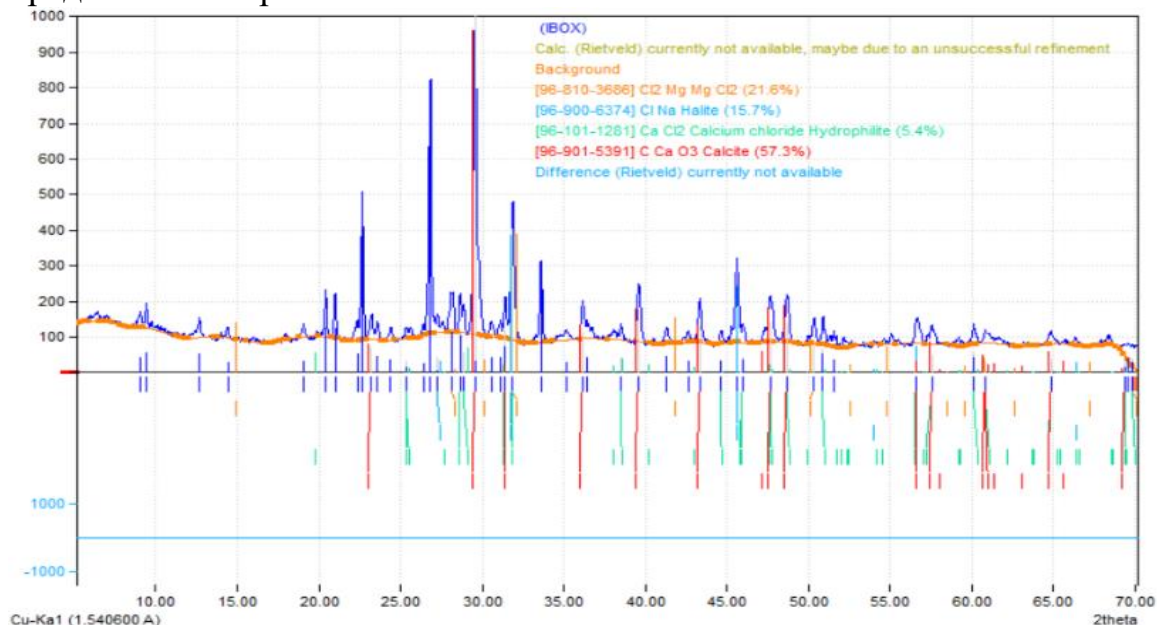


Рисунок 2 – Рентгеноструктурный анализ вторичного продукта (осадка) отделения водоподготовки комплекса по производству каустической соды

Полученные результаты химического анализа и теоретические данные, а также исследования методами ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа обнаружены NaCl в составе шлама стадии водо-

подготовки цеха каустической соды производства АО «Навоиазот» CaCO_3 , Na_2SO_4 , присутствуют $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и H_2O . В настоящее время ведутся научные исследования по получению новых видов продукции на основе шламов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хамдамова Ш. Ш., Тухтаев С. Растворимость системы хлорид кальция – хлорат натрия – вода при 20,50 °C // *Universum: технические науки*. 2016. № 6 (27). С. 67–72
2. Малинов Е.С., Шестаков А.Г., Семёнов А.М. и др. Реакция хлорида кальция с экзополимерным альгинатным матриксом, образованным штаммами *pseudomonas Aeruginosa* // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12 (часть 5) – С. 969–971
3. Макаров В.Н. Минералогические критерии комплексной переработки рудовмещающих гипербазитов. Апатиты, 1989. 94 с.

УДК 669.334.6

D.B. Kholikulov, Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Director for Research and Innovation;
O.N. Boltayev, PhD, Associate Professor of the Department of Metallurgy;
M.D. Elchiyeva, PhD student of the Department of Metallurgy
(Almalyk Branch of the Tashkent State Technical University named
after Islam Karimov (AB TSTU, Almalyk city, Uzbekistan))

POSSIBILITIES OF PROCESSING OF OXIDIZED COPPER ORE AT "ALMALYK MMC" JSC

The reduction of the base of mineral raw materials, the deterioration of the condition of quarries and mines, and the increasing requirements for environmental protection impose new requirements on the search and extraction of mineral resources. Improving existing technologies and increasing the share of hydrometallurgical processes in copper production are the main issues. Extraction of copper using hydrometallurgical processes is based on the treatment of oxidized copper ore with a solvent, followed by precipitation of the metal from the solution. Oxidized copper ores in the Kalmakyr mine of "Almaliq MMC" JSC can serve as a promising raw material for the development of copper metallurgy in Uzbekistan [1].

Involving oxidized ores in processing is one of the urgent problems for "Almalyk MMC" JSC. As of today, over the years, in 9 landfills, there are about 100 million tons of oxidized ore, in addition to the balance with a copper content of 0,455%, 10,4 million tons of ore with a balance of – 0,827% copper [2].

Flotation methods for copper oxide minerals mainly include direct flotation and sulfidation flotation. Direct flotation is performed by adding bulking and foaming reagents directly to the flotation process without the use of activators. Sulfidation flotation involves the addition of a sulfidizing reagent prior to the addition of a collecting reagent to modify the properties of mineral surfaces. Due to sulphidation, a highly active copper sulphide film is formed on the copper oxide mineral surface. Thus, xanthate scavengers with good selectivity are more likely to interact with the sulfided mineral surface. The main methods of direct flotation of copper oxides are chelate reagent flotation and fatty acid flotation. A chelate collector for copper oxide minerals usually has a strong collection capacity [3].

For mixed oxide-sulfide copper ores, the chelating collector can provide simultaneous flotation of copper oxide and copper sulfide minerals. However, the disadvantage of chelating collectors is their lack of selectivity, which can also affect their free rock. Compared to chelate collectors, fatty acids such as sodium oleate have several advantages as collectors.

Hydroxamic acid and its derivatives are used as collectors for direct flotation of copper oxide minerals. Hydroxamic acid directly covalently binds with metal cations on mineral surfaces through chemical adsorption and forms metal chelates. Metal cations on the mineral surface dissolve in the solution and form hydroxyl complexes, which are re-adsorbed on the mineral surface. Octyl hydroxamic acid and its derivatives are widely used in malachite flotation to increase the hydrophobicity of the mineral surface. Direct flotation is convenient for copper oxide ores with simple mineral composition and high quality. However, in actual production, the use of direct flotation for copper oxide ores with complex composition and low quality is ineffective. For this reason, it is appropriate to use sulfidation flotation for such ores [4].

The chemical composition of oxidized copper ore from the Kalmakyr mine No. 9 tailings dump of "Almalyk MMC" JSC was studied.

Table – Chemical composition of the oxidized ore sample from the No. 9 tailings dump

Minerals	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{total}	Fe _{oxide}	Fe _{sulfide}	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅
Content, %	61,88	13,19	6,82	6,37	0,45	4,7	0,91	1,99	0,04	0,26
Minerals	S _{total}	SO ₄	Pb	CaO	Zn	Ag, g/t	Au, g/t	Cu _{oxide}		Cu _{sulfide}
								free	bound	
Content, %	0,20	<0,25	0,0067	0,76	0,017	1,83	1,54	0,43	0,22	0,05

As can be seen from the table, the ore contains copper in both oxide and sulfide forms, with part of the oxidized copper existing in a free state and part bonded with other minerals. It was found that the ore contains

copper in both oxide and sulfide forms. Based on the studies of the processing works performed and implemented in practice, a technological scheme for processing oxidized copper ores to recover valuable components was developed for "Almalyk MMC" JSC. According to the proposed technology, it is suggested to first process the oxidized copper ore hydro-metallurgically, and then direct the remaining mass to flotation in order to separate copper in its sulfide form and extract rare metals.

The process was carried out in 3 stages using selective leaching and percolation. A sulfuric acid solution with a concentration of 70 g/l was used as the leaching agent. The copper recovery into the solution was 90-95%. The residual mass, after being washed, is crushed to -0.074 mm and sent to the flotation process. Effective flotation reagents are being studied to ensure the maximum flotation of copper minerals. The flotation concentrate obtained from the process is sent to control flotation, and the resulting concentrate is directed to the copper smelting plant, while the waste is returned to the process for re-flotation.

In conclusion, the structure of the minerals in the ore and the preparation processes for their treatment significantly impact the flotation process when processing oxidized copper ores. Selecting effective reagents in the flotation process is a key condition, as it is necessary to enhance the hydrophobic properties of the minerals and ensure their attachment to the air-water interface. Selective leaching in the heap is considered one of the most efficient methods for separating oxidized minerals, where various reagents can be used as solvents. After selective leaching, both free and bound copper oxides transition into the solution, resulting in the exposure of the surface of copper sulfide minerals, which ensures their easy flotation. The recovery of oxidized copper minerals reaches 90-95%. During the flotation process, gold and silver can also be separated along with the sulfide minerals.

REFERENCES

1. Исследование по извлечению меди из окисленных руд АО «Алмалыкский ГМК» агитационным серноокислотным выщелачиванием // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Холикулов Д. Б. [и др.]. 2022. 1(94). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12905>.

2. Д.Б. Холикулов, Б.Е. Ниязметов, О.Н. Болтаев Исследования характеристики окисленных медных руд месторождения Кальмакир. DOI: 10.34923/technogen-ural.2023.26.87.011 с. 64-67. <http://imet-uran.ru/tech2023/64-67.pdf>

3. M.D. Elchiyeva, D.B. Xoliqulov, O.N. Boltayev. "Olmaliq KMK" AJ sharoitida oksidlangan mis rudalarini qayta ishlash imkoniyatlari // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences ISSN:

2181-144X. DOI: 10.24412/2181-144X-2024-1-80-87.
<http://sciencealgorithm.uz/?portfolio=olmaliq-kmk-aj-sharoitida-oksidlangan-mis-rudalarini-qayta-ishlash-imkoniyatlari>

4. D.B. Xolikulov, O.N. Boltayev, X.R. Xaydaraliyev. Mis ishlab chiqarish texnologik eritmalaridan metallarni cho'ktiruvchi reagentlar yordamida ajratish. Doi: 10.24412/2181-144X-2020-2-36-45.
<http://sciencealgorithm.uz/wp-content/uploads/2020/11/6.Xoliqulov-D.B.-Boltayev-O.N.-Xaydaraliev-X.R.pdf>

УДК:661.342

Ф.Б. Чавлиева, Б.Х. Кучаров

(Институт общей и неорганической химии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан)

Б.Б. Туракулов, А.У. Эркаев, А.Н.Бобокулов

(Ташкентский химико-технологический институт, г. Ташкент, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОЛИТА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ ХЛОРИДА КАЛИЯ В МЕМБРАННОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЁРЕ

К существующей мембранной установке [1–5] присоединили лабораторный вакуумный насос так чтобы из анодной части электролизёра образующиеся газообразные продукты подсасывались. Такое изменение в установке дало б уменьшение содержание гипохлорита и хлоратов в составе анолита (солевой раствор обедненный хлоридом натрия), что позволяет использовать анолит в рабочем цикле многократно [6–7]. Эксперименты проводили при различной продолжительности до 80 минут и вакууме от 30 до 90 мм рт. ст. изменяя температуру от 60 до 90⁰С. При этом после опыта определяли содержание гипохлорита и хлората в анолите. Полученные и рассчитанные экспериментальные данные приведены в таблицах 1–3.

Гипохлорит определяли методом ионометрии. Условия при анализе активного хлора в анолите: концентрация тиосульфата натрия 0,05 н; йодида калия – 5 см³; 10%-ного раствора крахмала 1 см³, 1 %-ного, объем пробы продукта 10 см³. Расчет активного хлора производили по следующей формуле:

$$X_{\text{эл}} = \frac{V_{\text{TCH}} \cdot 0,003545 \cdot 1000}{10 \cdot 2} = V \cdot 0,17725$$

Хлорат-ионы определяли титриметрическим методом, основано на их восстанавливая их сернокислым железом (II) в кислой среде при нагревании и последующем определении избытка восстановителя раствором перманганата калия. Химизм реакции восстановления хлорат-иона: $\text{KClO}_3 + 6\text{FeSO}_4 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KCl} + 3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$. Определе-

ние количества избытка железа (II) проходит по реакции:
 $10\text{FeSO}_4 + 2\text{KMnO}_4 + 8\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 5\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{MnSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + 8\text{H}_2\text{O}$.

Температуру процесса замеряли на ртутных стеклянных лабораторных термометрах ГОСТ 215-73. Как источник питания постоянного тока использована установка GUNT Geratebau GmbH CE – 105 (Германия). Водородные показатели полученных продуктов гипохлоритов измерены на рН-метре марки Vante 210. Исходя из данных таблицы 1 можно считать, что увеличение температуры и степени разряжения (вакуумирования) положительно влияет на чистоту рабочего раствора хлорида калия.

Таблица 1 – Влияние вакуумирования на процесс очистки хлорида калия

№	Процесс вакуумирования			Гипохлорит, %	ClO_3^-
	Вакуум, мм.рт.ст	T, °C	Продолжительность, мин.		
1	2	3	4	5	6
1	30	90	0	4,2	2,07
2			10	3,82	1,38
3			20	1,84	1,35
4			40	1,41	1,29
5			80	0,95	1,18
6	60	90	0	4,2	2,07
7			10	3,55	1,89
8			20	1,64	1,77
9			40	1,31	1,68
10			80	0,92	1,29
11	90	90	0	4,2	2,07
12			10	1,98	1,69
13			20	1,45	1,61
14			40	1,16	1,38
15			80	0,92	1,10
16	30	75	0	4,2	2,07
17			10	2,9	1,89
18			20	2,5	1,67
19			40	2,1	1,66
20			80	1,5	1,61
21	60	75	0	4,2	2,07
22			10	2,8	1,95
23			20	2,3	1,74
24			40	1,9	1,72
25			80	1,4	1,68
26	90	75	0	4,2	2,07
27			10	2,7	1,96
28			20	2,1	1,83
29			40	1,7	1,78
30			80	1,3	1,65

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
31	30	60	0	4,2	2,07
32			10	3,6	1,71
33			20	3,5	1,62
34			40	2,2	1,59
35			80	2,2	1,51
36	60	60	0	4,2	2,07
37			10	3,5	1,68
38			20	3,2	1,62
39			40	2,0	1,64
40			80	1,8	1,59
41	90	60	0	4,2	2,07
42			10	3,4	1,88
43			20	3,0	1,79
44			40	1,8	1,75
45			80	1,6	1,63

Таблица 2 – Условные показатели электролизёра

Общая масса		Плотность тока А/дм ²	Температура °С	рН КОН	рН KCl
КОН	KCl				
511,82	509,06	5	80	14,78	2,36

Таблица 3 – Физический анализ полученного КОН

Продолжительность (мин)	Плотность КОН ρ при 15 °С		Плотность KCl, ρ при 20 °С		Концентрация КОН % до электролиза	Концентрация КОН % после электролиза	ΔС КОН
	до электролиза	после электролиза	до электролиза	после электролиза			
80	1,267	1,272	1,167	1,170	28,488	30,268	1,78

Полученные экспериментальные данные приведены в таблице 3, которые показывают, что в заданных условиях с повышением продолжительности прохода исходных растворов (с повышением времени подачи в электролизер), концентрация гидроксида калия повышается от 0,43 до 1,74%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнева Т.А., Тихомирова И.А. Электромембранная очистка раствора гидроксида калия от хлорид-ионов // Серия Критические технологии. Мембраны, 2005, № 2 (26).
2. Watking I.M., McLoney D.E., Nation (R) membranes the chloralkali industry // Symposium Chlorine Technology Venice. Oronzio de Nora, Milano, Italy. 1979. 191 p.
3. Калия гидрат окиси технический. ТУ ГОСТ 9285-78. – М.: Изд-во стандартов. 1984. – 23 с.

4. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 1999. – 518 с.

5. Чавлиева Ф.Б. [и др.] Зависимость выхода гидроксида калия от плотности тока в мембранном электролизере // Республиканская научно-практическая конференция с участием зарубежных ученых. 13–14 декабря 2022 г. – Ташкент.

6. Turakulov B.B., Erkayev A.U., Kucharov B.X., Toirov Z.K. Physical-chemical and Technological Bases of Producing Pure Potassium Hydroxide in Combined Method. // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – Volume 29. – Issue. – 6. – p. 1126–1134.

7. Патент. 2064432 Россия. Способ получения чистого гидроксида калия. // Канель М.З., Коноплев Е.В., Шестеркин И.А. [и др.] Опубл. 21 марта 2013 г.

УДК: 546.06

А.А. Курагин, асп.;

В.Ю. Долуда, д-р хим. наук

(Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия)

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПОСТРОЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦЕОЛИТОВ

Введение

Цель данного исследования – изучить механизмы образования цеолитов и предложить пути оптимизации их синтеза. Важное внимание уделено реакционной сети и кинетическим особенностям процесса, так как тщательное управление этими аспектами может улучшить качество конечного продукта. Настоящая работа предлагает рассмотреть возможности применения новых аналитических подходов для наблюдения и оптимизации синтетических стадий, что может значительно повысить управляемость и прогнозируемость процессов, лежащих в основе формирования цеолитов.

Механизмы синтеза цеолитов

Процесс синтеза синтетических цеолитов включает в себя множество разнообразных химических реакций, что делает его весьма сложным в понимании и интерпретации. Ключевым этапом в процессе синтеза синтетических цеолитов является метилирование и разложение адсорбированных алкенов и ароматических соединений, что подчеркивает значимость химического состава реагентов и их взаимосвязей в синтетических условиях [1].

Структура цеолитов играет критическую роль в определении их функциональных характеристик и применений. Основу архитектуры составляет шестиугольные призмы и канкритовые клетки, которые обеспечивают устойчивость и целостность материалов. Эти структурные единицы взаимодействуют друг с другом, формируя более крупные суперклетки [2].

Учитывая все вышесказанное, понимание механизма синтеза цеолитов требует глубинного изучения как химических реакций, так и уникальных структурных особенностей, таких как суперклетки и канкритовые единицы. Эти аспекты не только влияют на скорость и эффективность синтеза, но и на последующее использование цеолитов в промышленных процессах.

Кинетические модели процесса образования цеолитов

Процесс создания кинетических моделей для синтеза цеолитов представляет собой сложную задачу, поскольку необходимо учитывать множество химических реакций и влияющих факторов. Эти модели должны быть достаточно детализированными, чтобы адекватно отражать происходящие процессы, но, одновременно, простыми в использовании для анализа и проектирования. Как подчеркивается, «естественная тенденция и основная проблема заключается в упрощении моделей и в том, чтобы сделать их адекватными для анализа, проектирования и управления» [3]. Это упрощение позволяет моделям сохранять практическую применимость и быть полезными в контексте реальных промышленных условий.

Успешное построение моделей требует применения соответствующих математических методов. При этом использование стохастических и нечетких подходов становится целесообразным решением для упрощения сложных кинетических моделей, рассматривается возможность их использования для получения сокращенных моделей конверсии метанола в олефины [3]. Эти методы позволяют учитывать множество неопределенностей и динамику процессов, эффективно сокращая количество необходимых расчетов, что делает анализ более управляемым.

Таким образом, для достижения оптимальных результатов в проектировании и управлении процессами синтеза цеолитов, актуальной задачей остается балансирование между комплексностью моделей и их прикладной ценностью. Внедрение стохастических и нечетких методов становится ключевым в процессах упрощения, позволяя моделям оставаться полезными, даже несмотря на многофакторность и сложность базовых химических механизмов.

Влияние условий на синтез цеолитов

Температура и давление играют ключевую роль в процессе синтеза цеолитов, непосредственно влияя на кинетику реакции и распределение продуктов. Например, «увеличение температуры приводит к изменению распределения продуктов в конверсии метанола на катализаторах HZSM-5, что аналогично увеличению интервала времени при постоянной температуре» [1]. Это явление подчеркивает важность тонкого контроля условий реакции для достижения оптимальной эффективности синтеза. Изменение температуры может привести к появлению более активных реакционных компонентов, что усиливает взаимодействия между реагентами и способствует развитию потенциально более быстрых или альтернативных реакционных путей.

Кроме того, условия синтеза, такие как давление и температура, могут вызывать физические изменения в структуре катализаторов, что существенно влияет на их активность и стабильность. В экстремальных условиях, какими являются высокие температуры (необходимые для МТО-процесса), цеолиты могут подвергаться деалуминации из-за воды, что значительно снижает их каталитическую активность [4]. Таким образом, регулирование как температуры, так и влажности стало ключевой задачей в области оптимизации процессов синтеза цеолитов.

Отдельное внимание следует уделить тому, как изменения в температуре и давлении могут быть использованы для достижения контроля над скоростью и селективностью процесса.

Важно отметить, что чрезмерные значения этих параметров могут привести к возникновению нежелательных побочных реакций и усугублению проблем с долговечностью катализаторов.

В то же время, тщательный подход к регулированию и мониторингу температуры и давления может позволить снизить затраты на производство и достичь более совершенных материалов с уникальными физическими и химическими свойствами. Это делает их контроль важнейшей задачей для исследователей и инженеров, работающих в области синтеза цеолитов.

Заключение

Нами рассмотрена сложная и многогранная задача синтеза синтетических цеолитов, которая требует понимания как химических реакций, так и уникальных структурных особенностей этих материалов. Процесс синтеза включает ключевые реакции метилирования и разложения адсорбированных алкенов и ароматических соединений, что подчеркивает значение состава реагентов в синтетических условиях. Структурная организация цеолитов – с характерными шестиугольни-

ми призмами и канкритовыми клетками – обеспечивает их устойчивость и функциональные возможности, включая катализ и адсорбцию.

Анализ показал, что успешное управление процессами синтеза и улучшение функциональных характеристик цеолитов возможно через глубокое понимание реакционной сети и структурных особенностей. Кинетика и организация цеолитов играют критическую роль в определении их приложений.

Эти аспекты становятся особенно актуальными при разработке эффективных методов синтеза, которые позволяют создавать цеолиты с заданными свойствами, востребованными в промышленности.

Заметное внимание уделено роли математического моделирования, включая стохастические и нечеткие методы, в упрощении и анализе процессов, что делает эти модели более приемлемыми для практического применения. Эта синергия между теорией и практикой способствует созданию более эффективных моделей и улучшению производственных процессов.

Таким образом, исследование синтеза синтетических цеолитов демонстрирует не только сложность, но и значительные возможности для оптимизации процесса, имея потенциал для значительных улучшений в химической промышленности.

Дальнейшие исследования должны акцентировать внимание на улучшение контроля параметров синтеза и внедрение новых подходов, что позволит создать цеолиты с оптимальными характеристиками для удовлетворения современных требований технологий и производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Janssens V.W. Ton, Svelle S., Olsbye U. Kinetic modeling of deactivation profiles in the methanol-to-hydrocarbons (MTH) reaction: A combined autocatalytic–hydrocarbon pool approach // *Journal of Catalysis*. – 2013. – Т. 308. – С. 122–130.
2. Froment G. F., Dehertog W. J. H., Marchi A. J. Zeolite Catalysis in the Conversion of Methanol into Olefins // [Электронный ресурс]. – URL: <http://pubs.rsc.org> | doi:10.1039/9781847553218-00001.
3. Iordache O. M., Maria G. C., Pop G. L. Lumping Analysis for the Methanol Conversion to Olefins Kinetic Model // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1988. – Т. 27. – С. 2218–2224.
4. Gayubo A. G., Aguayo A. T., Olazar M., Vivanco R., Bilbao J. Kinetics of the irreversible deactivation of the HZSM-5 catalyst in the MTO process // *Chemical Engineering Science*. – 2003. – Т. 58. – С. 5239–5249.
5. Kumar P., Thybaut J.W., Teketel S., Svelle S., Beato P., Olsbye U.,

Marin G.B. Single-Event MicroKinetics (SEMK) for Methanol to Hydrocarbons (MTH) on H-ZSM-23 // *Catalysis Today*. – 2013. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2013.02.017>.

6. Liang Q., Wei Y., Xu L., Liu Z. M. Reaction Behaviors and Kinetics during Induction Period of Methanol Conversion on HZSM-5 Zeolite // *ACS Catal.* – 2015. – DOI: 10.1021/acscatal.5b00654.

7. Li N., Meng C., Liu D. Deactivation kinetics with activity coefficient of the methanol to aromatics process over modified ZSM-5 // *Fuel*. – 2018. – Т. 233. – С. 283–290. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.044>.

8. Müller S., Liu Y., Kirchberger F. M., Tonigold M., Sanchez-Sanchez M., Lercher J. A. Hydrogen transfer pathways during zeolite catalyzed methanol conversion to hydrocarbons // *J. Am. Chem. Soc.* – 2016. – Just Accepted Manuscript. – DOI: 10.1021/jacs.6b09605.

9. Park T.-Y., Froment G. F. Analysis of Fundamental Reaction Rates in the Methanol-to-Olefins Process on ZSM-5 as a Basis for Reactor Design and Operation // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2004. – Т. 43, № 3. – С. 682–689. – DOI: 10.1021/ie030130r.

10. Park T.-Y., Froment G. F. Kinetic Modeling of the Methanol to Olefins Process. 1. Model Formulation // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2001. – Vol. 40, No. 20. – С. 4172–4186.

11. Park T.-Y., Froment G. F. Kinetic Modeling of the Methanol to Olefins Process. 2. Experimental Results, Model Discrimination, and Parameter Estimation // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2001. – Т. 40, № 20. – С. 4187–4196.

12. Renb Bos A. N., Tromp P. J. J. Conversion of Methanol to Lower Olefins. Kinetic Modeling, Reactor Simulation, and Selection // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1995. – Т. 34. – С. 3808–3816.

13. Schipper P. H., Krambeck F. J. A reactor design simulation with feversidle and irreversidle catalyst deactivation // *Chemical Engineering Science*. – 1986. – Vol. 41. – No. 4. – С. 1013–1019.

14. Aguayo T.A., Mier D., Gayubo A.G., Gamero M., Bilbao J. Kinetics of Methanol Transformation into Hydrocarbons on a HZSM-5 Zeolite Catalyst at High Temperature (400–550 °C) // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2010. – Т. 49, № 24. – С. 12371–12378.

15. Benito L.P., Gaybo A.G., Aguayo T.A., Castilla M., Bilbao J. Concentration-Dependent Kinetic Model for Catalyst Deactivation in the MTG Process // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1996. – Т. 35, № 1. – С. 81–89.

16. Ilias S., Bhan A. Mechanism of the Catalytic Conversion of Methanol to Hydrocarbons // *ACS Catalysis*. – 2013. – Т. 3. – С. 18–31.

17. Mihall Raul - Kinetic Model for Methanol Conversion to Olefins

// Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 1983. – Т. 22, № 3. – С. 532–538.

18. Sedran U. - Modelling methanol conversion to hydrocarbons: alternative kinetic models // Chemical Engineering Journal. – 1990. – Т. 45. – С. 33–42.

19. Keil J. Frerich - Methanol-to-hydrocarbons process technology // Microporous and Mesoporous Materials. – 1999. – Т. 29. – С. 49–66.

УДК 669.333:669.054.8

С.С. Муталибхонов, ст. преп. кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D, доц. кафедры «Металлургия»;
Ш.Б. Каршибоев, Ph.D, зав. кафедрой «Металлургия»;
И.И. Шайманов, докторант кафедры «Металлургия»;
(АФ ТГТУ, г. Алмалык, Узбекистан)

ПЕРЕРАБОТКА МЕДНЫХ ШЛАКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРООКСИДА НАТРИЯ

Существующие запасы меди, находящиеся в эксплуатации, можно считать законной частью мировых запасов меди. При надлежащем управлении переработка отходов может привести к увеличению использования ресурсов и минимизации энергопотребления, выбросов и утилизации отходов. Замыкание металлических цепей за счет более широкого повторного использования и рециркуляции повышает общую производительность ресурсов. Исследование переработки шлаков медного производства имеет важное значение по нескольким причинам. Шлаки медного производства содержат множество токсичных веществ, таких как тяжёлые металлы (например, кадмий, свинец, цинк), а также соединения серы и хлора. Их накопление и неправильная утилизация могут привести к загрязнению окружающей среды, включая водоемы и почву. Шлаки содержат значительное количество меди и других полезных металлов, которые могут быть извлечены с использованием современных технологий переработки.

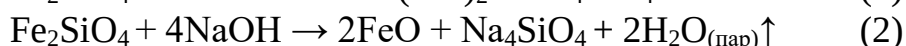
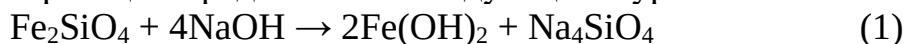
Множество ученых и исследователей разработали технологии переработки шлаков медного производства. Китайскими учеными предложено двухстадиальное выщелачивание аммиачным раствором, осуществляемое в системе серной кислоты и перекиси водорода. Применение статистических и математических методов к процессу выщелачивания дополнительно поможет в оптимизации параметров выщелачивания меди [1–2]. С помощью трехстадийного пирометаллургического процесса из медного шлака были получены высококачественные стальные шары для измельчения и пропанты [3]. Ученые из Индии предлагают производство щелочно-активированного медно-шлакового цемента методом низкотемпературного обжига гидрадаци-

онно- и рентгено-порошковую дифракцию [4]. Медный шлак в смеси с Na_2SO_4 , Na_2CO_3 и углем подвергается сульфатирующему обжигу при температуре 600–800°C, затем шлак обрабатывается содо-щелочной избирательной экстракцией, и в конечном итоге получается товарная продукция [5].

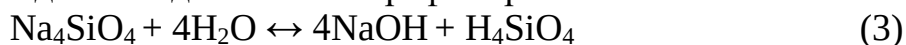
Подготовка восстановительно-сульфидирующей композиции: как восстановительное вещество использованы цинковые шлаки производства, а в качестве сульфидирующего вещества – отходы, содержащие пирит [6]. Разработан метод добавки резиновых отходов при сливе шлака конвертерного в ковш, с целью интенсивного барботажа в нём для восстановления магнетита [7].

Шлаки содержат множество различных компонентов, включая металлы, оксиды, сульфиды, силикаты, в том числе токсичные вещества. Это делает их химически сложными для обработки и требует применения специализированных технологий. Для извлечения меди и других металлов часто требуются высокие температуры (до 1000–1200°C), что увеличивает энергетические затраты и износ оборудования. Шлаки могут содержать опасные вещества, такие как свинец, кадмий, ртуть и другие тяжёлые металлы, которые могут загрязнять окружающую среду при неправильной переработке.

Авторами предлагается технология переработки шлаков с использованием гидрооксида натрия. В процессе переработки фаялит в составе шлака разрушается и образуется силикат натрия. Протекающие химические реакции представлены следующими уравнениями:



Затем силикат натрия подвергается к выщелачиванию. В результате из кека, не перешедшего в раствор при выщелачивании, извлекается медь по отдельной схеме. Полученный металл может быть передан в анодное отделение для огневого рафинирования.



Анализ литературы показывает, что предлагаемый метод имеет ряд определённых преимуществ по сравнению с другими технологиями.

Эффективность технологии: предложенная методика переработки шлаков медного производства позволяет достичь высокоэффективного извлечения меди, которое может составлять до 99%, что значительно превосходит традиционные флотационные методы, где извлечение меди составляет лишь около 60%.

Экономическая целесообразность метода, его простота и дешевизна делают его привлекательным для широкого внедрения в промышленность.

Экологические преимущества данного подхода также значительны – процессы не связаны с выбросом токсичных отходов в атмосферу, что способствует снижению загрязнения воздуха.

Существуют недостаток, который следует учитывать, состоит в том, что примеси могут требовать дальнейшей обработки для их безопасной утилизации, что может увеличивать сложность и стоимость процесса. Использование в процессе переработки гидроксида натрия может привести к образованию токсичных отходов.

Тем не менее, учитывая экономическую целесообразность и экологические преимущества, технология переработки медных шлаков с применением гидроксида натрия имеет значительный потенциал для внедрения в промышленность и может существенно улучшить управление отходами медного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xiaoyan L., Zhang W., Dong J., Wang Q., Sun Z. A Cleaner Process for Selective Recovery of Valuable Metals from Copper Slags // *Environmental Science & Technology*. 2015. Т. 49. № 5. С. 3026–3033.
2. Xu Y., Jiang L., Zhang T., Wang M., Liu Z. Optimizing the Leaching Parameters and Studying the Kinetics of Copper Extraction from Copper Slag // *ACS Omega*. 2021. Т. 6. № 11. С. 7500–7509.
3. Roshchin V.E., Adilov G.A., Povolotckii A.D., Kapelyushin Y. Complex Processing of copper smelting slags with obtaining of cast iron grinding media and proppants // *Fundamental research and applied developing of recycling and utilization processes of technogenic formations. KnE Materials Science*. – P. 462–471.
4. Jagmeet Singh., S.P. Singh. Utilization of alkali-activated copper slag as binder in concrete // *Frontiers of structural and civil engineering*. – 2021. – Т. 15. С. 773–780.
5. Sokolovskaya L., Kvyatkovskiy S., Kozhakhmetov S., Semenova A., Sukurov B., Dyussebekova M., Shakhlov A. Slag after smelting of anode mud: Role of sulphiding sintering // *Minerals*. – 2023. – Т. 14. С. 781–793.
6. Юсупходжаев А.А. Разработка рациональной технологии получения меди из шлаков медного производства: Дис. д-ра техн. наук. – Ташкент: институт общей и неорганической химии АН РУ, 2002. – 250 с.
7. Khojiev Sh.T. Pyrometallurgical Processing of Copper Slags into the Metallurgical Ladle // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. – India, February 2019. – Vol.6, Issue 2. – P.8094 – 8099.

С.Ш. Шарипов, PhD, зав. кафедрой;
Б.Ф. Мухиддинов, проф., д-р техн. наук;
Р.А. Данакулова, студ.
(НГГТУ, г. Навои, Узбекистан)

ОКИСЛИТЕЛЬНЫЙ ОБЖИГ УПОРНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ АУМИНЗО-АМАНТАЙ

Применение традиционных методов переработки упорных сульфидных руд не всегда даёт положительные результаты, так как характеристики таких типов руд требует использование более рациональных способов [1–3]. Одним из таких эффективных способов обогащения является применение окислительного обжига [4–5]. Окислительный обжиг, по сути, считается термохимическим процессом, в котором происходит нагрев упорных сульфидных руд в присутствии кислорода для изменения химического состава, улучшения их перерабатываемости и извлечения ценных металлов. На сегодняшний день процессы окислительного обжига выполняют на современных печах псевдоожиженного кипящего слоя и ротационном оборудовании [6–7]. Основные направления исследований в этой области будут направлены на определение оптимальных параметров процесса окислительного обжига.

Нами, для установления оптимальных температурных режимов обжига, выполнены следующие эксперименты. Исходный материал флотоконцентрата ГМЗ-5 подвергали обжигу в разных температурных интервалах от 300 °С до 800 °С. Процесс выполняли в муфельной печи марки SNOL 8,2/1100 LSM01. Время эксперимента во всех случаях составило 15–120 мин с перемешиванием материала каждые 10 мин. Перед началом опыта определяли основные показатели исходного флотоконцентрата. При этом исходный флотоконцентрат имел следующие показатели:

$Au = 20,0 \text{ г/т}$; $S_s = 17,64 \%$; $C_{орг} = 2,98 \%$; влаж. = 9,79 %

В ходе обжига тщательно наблюдали над видоизменениями материала и газовыделением. По результатам эксперимента можно констатировать что при 300 °С и протяженности эксперимента 2 ч, выделение газов не наблюдалось. Проба в конце опыта имела буро-серый цвет. При 400 °С с небольшой подачей воздуха при продолжительности эксперимента 2 ч, в конце опыта наблюдается характерный запах. Цвет пробы – серый. При 500 °С с подачей воздуха через 15 мин наблюдается накаливание пробы, через 1 ч накаливание не наблюдается, но изменяется цвет пробы до коричневого. При 600 °С через 10 мин начинается накаливание пробы, через 40 мин накаливание не наблюдается, выделение газов также не наблюдается, цвет пробы из-

меняется на коричневый. При 700 °С происходит следующее: через 7 мин начинается накаливание пробы, но после обработки в течение 1 и 2-х ч пробы еще были накалены, выделение газов не наблюдалось. Цвет пробы – красновато коричневый. При 800 °С через 5 мин начинается накаливание пробы, но после часовой и двухчасовой обработки проба еще была накалена. При этом образовались большие окатыши, цвет пробы – красно-коричневый, выделение газов не наблюдалось.

Таблица – Результаты лабораторных испытаний по обжигу флотоконцентрата ГМЗ-5 при разных температурах

№	Температурный режим, °С	Состав огарка			Au в хвостах сорбции, г/тн	Извлечение, %
		Au, г/тн	Ss, %	C _{орг} , %		
1	300	22,3	15,83	2,62	8,5	61,8
2	400	24,2	7,44	2,38	8,9	63,2
3	500	27,2	0,31	0,54	4,4	86,3
4	600	25,9	0,09	0,17	4,25	83,5
5	700	26,6	0,1	0,16	9,15	65,6
6	800	26,8	0,013	0,09	13,85	48,0

Результаты опыта показывают, что хорошие результаты получены в промежутке 500–600 °С. Именно в этих температурах происходит активное окисление сульфидных минералов. При относительно низких температурах (<500–600°С) окислительные реакции протекают медленно и при этом сульфиды частично могут окисляться. Полученные результаты по извлечению металла только подтверждает данный факт. По мере увеличения температуры обжига окисления сульфидных минералов протекает интенсивно, с образованием оксидов металлов (например, Fe₂O₃, CuO), наблюдается интенсивное выделение газов – продуктов реакции. Кроме того, температурный режим способствует протеканию фазовых превращений. При низких температурах обжига сульфидных минералов образуется пирротины и соответствующие сульфаты элементов. При условиях стыковки температурного режима и температур плавления собственных, порообразующих и аксессуарных минералов может протекать спекание продуктов реакции. Образующие промежуточные продукты и окиды металлов, покрывая поверхность материала, будут ограничивать доступ кислорода, снижая пористость массы, что в конечном итоге приводит к уменьшению извлечения металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // ГИАБ. 2016. №2. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-pererabotki-bednyh-i-upornyh-zolotosoderzhaschih-rud> (дата обращения: 19.01.2025).

2. Никитина Т.Ю., Петров Г.В. Современное состояние и технологические перспективы применения малотоксичных растворителей золота для переработки техногенного сырья // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-tehnologicheskie-perspektivy-primeneniya-malotoksichnyh-rastvoriteley-zolota-dlya-pererabotki-tehnogennogo> (дата обращения: 19.01.2025).

3. Резник Ю.Н., Шумилова Л.В. Способ подготовки упорных сульфидных золотосодержащих руд к выщелачиванию // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-podgotovki-upornyh-sulfidnyh-zolotosoderzhaschih-rud-k-vyshchelachivaniyu> (дата обращения: 19.01.2025).

4. Kubaschewski, O. and Alcock C.B. (1979) Metallurgical Thermochemistry, 5th Edition, Pergamon, Oxford.

5. Hapid, A., Zullaikah, S., Mahfud, Kawigraha, A., Sudiyanto, Y., Benita Nareswari, R., & Quitain, A. T. (2024). Oxidation of sulfide mineral and metal extraction analysis in the microwave-assisted roasting pretreatment of refractory gold ore. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), Article 105447. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105447>

6. https://www.researchgate.net/publication/387558440_Advancements_in_improving_gold_recovery_from_refractory_gold_oresconcentrates_a_review

7. Gao L. et al. Separation and recovery of iron and nickel from low-grade laterite nickel ore using reduction roasting at rotary kiln followed by magnetic separation technique //Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Т. 36. – С. 375-384.

УДК: 547.371:547.372

А.Т. Гаффоров, базовый докторант;
С.Ш. Шарипов, PhD, зав. кафедрой;
Р.А. Данакулова, студ.; А.Л. Рузибоев, студ.
(НГГТУ, г. Навои, Узбекистан)

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА НИКЕЛЬ- И ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Сегодня во всем мире спрос на соединения никеля и хрома в промышленных масштабах растет день за днем. Соединения никеля и

хрома широко применяются во многих отраслях народного хозяйства и промышленности. Одним из таких направлений считается новые каталитические системы на основе соединений никеля и хрома. По этой причине создание новых селективных катализаторов и эффективное использование существующих катализаторов является одной из самых актуальных проблем сегодня. Катализаторы системы НИАП являются базовыми соединениями в аммиачной технологии и при помощи таких катализаторов проводятся процессы очистки газовых систем, а также синтез азотсодержащих продуктов. Основой применения данных типов катализаторов является то, что со временем в процессе эксплуатации активность каталитической системы снижается, и катализаторы снимаются из процесса и собираются в отдельные хранилище в качестве отработанной продукции. В связи с вышеизложенным возникает острый вопрос о использовании отработанных катализаторов в качестве вторичной продукции для продукции никель- и хромсодержащих товарных соединений.

Производство никель- и хромсодержащих материалов из вторичных ресурсов стало важным направлением в металлургической промышленности. Это связано с ростом спроса на эти металлы, экологическими требованиями к сокращению отходов, а также ограниченностью первичных природных ресурсов. Основными направлениями при использовании вторичных ресурсов является отходы металлургической промышленности, отработанные каталитические системы, отходы электронной промышленности и конечно же вторичное сырьё гальваники и коррозионных покрытий [1].

В работе [2] рассматриваются меняющиеся судьбы рынков никеля и хрома, которые тесно связаны с производством нержавеющей стали. За последние несколько десятилетий рост рынка нержавеющей стали опережал рост рынков углеродистой стали, алюминия, меди и цинка, и в результате спрос на никель и хром превалировал. Превращение Китая в крупнейшего в мире производителя нержавеющей стали – по оценкам, 54% мировых поставок в последние годы – означает, что в миру необходимо больше хромовой руды. Однако в ближайшие годы это соотношение, скорее всего, снизится, поскольку рост электрификации автомобильного транспорта приведет к повышению потребности в никеле, применяемом в аккумуляторах.

В обзоре [3] обобщены ресурсы никеля и состояние различных процессов/технологий, которые наиболее актуальны, поскольку разрабатываются для извлечения никеля и сопутствующих металлов из первичных и вторичных ресурсов. Было показано извлечение никеля из первичных ресурсов, таких как руды/минералы (сульфиды, арсениды, силикаты и оксиды), включая нетрадиционные, а именно, полиметаллические морские конкреции и различные вторичные ресурсы. Из-

вестные источники, которые подробно рассматриваются, включают твердые отходы, такие как отработанные батареи, а именно, отслужившие свой срок никель-кадмиевые (NiCd) и никель-металлгидридные (NiMH), отработанные катализаторы и отработанные/ломовые суперсплавы, а также жидкие отходы, такие как медный поток и гальванические стоки.

В работе [4] хромсодержащие шлаки, получаемые при выплавке нержавеющей стали, использованы как вторичный ресурс для извлечения хрома. Для начала были исследованы физико-химические характеристики шлаков, после чего апробированы обычные и новые методы извлечения хрома из шлаков, включая физическое разделение, восстановительную плавку, термическую плазму, щелочное выщелачивание обжигом-водой, щелочное выщелачивание и процессы биовыщелачивания. Особое внимание было уделено техническим проблемам, возникающим при извлечении хрома из шлаков, и возможным мерам по повышению извлечения хрома за счет совершенствования эффективности переработки.

В исследовании [5] было изучено выщелачивание хвостов, содержащих 29,6 мас.% Ni в серной кислоте. Хвосты были охарактеризованы методами рентгеновской порошковой дифракции (XRD), рентгеновской флуоресценции (XRF) и индуктивно связанной плазмы (ICP-OES). Процесс промывки для отделения вольфрама от хвостов проводился в дистиллированной воде при 80 °C в течение 240 мин. После фильтрации твердого остатка из раствора вольфрама методом вакуумной фильтрации были проведены испытания по выщелачиванию партии твердого остатка при атмосферном давлении в перемешиваемом растворе кислоты. Изучено влияние концентрации серной кислоты, плотности пульпы, размеры частиц и влияние температуры на растворение никеля. Результаты показали, что выщелачивание около 99% содержания никеля в промытых хвостах может быть достигнуто с использованием 4,0 моль серной кислоты, плотности пульпы 1/20 г/мл и размера частиц -180 +250 мкм при 80 °C через 240 мин.

Вышеприведенные исследования отражают актуальность и необходимость существующей проблемы, так как производство никель- и хромсодержащих продуктов из вторичных ресурсов имеет высокий потенциал как с точки зрения экономической эффективности, так и с точки зрения экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дадаходжаев А.Т., Мураткулов О.К., Якибова Д.Х., Юнусов О.К., Рахимова Л.С., Абдутаалипова Н.М. Некоторые результаты

исследования переработки отработанных ванадиевых катализаторов. Том 27, № 2 (2023).

2. Pariser, H.H., Backeberg, N.R., Masson, OCM, & Bedder, JCM. (2018). Изменение рынков никелевой и хромированной нержавеющей стали – обзор. Журнал Южноафриканского института горного дела и металлургии, 118 (6), 563-568. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1>.

3. Meshram, P., Abhilash, & Pandey, B. D. (2018). Advanced Review on Extraction of Nickel from Primary and Secondary Sources. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 40(3), 157–193. <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.15143004>. №3 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-negativnogo-vozdeystviya-galvanicheskogo-proizvodstva-na-okruzhayuschuyu-sredu> (дата обращения: 19.01.2025).

4. Foquan Gu, Yuanbo Zhang, Zijian Su, Yikang Tu, Shuo Liu, Tao Jiang, Recovery of chromium from chromium-bearing slags produced in the stainless-steel smelting: A review, Journal of Cleaner Production, Volume 296, 2021, 126467, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126467>.

5. Seyed Abolfazl Hosseini, Shahram Raygan, Ahmad Rezaei, Ali Jafari, Leaching of nickel from a secondary source by sulfuric acid, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 5, Issue 4, 2017, Pages 3922-3929, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.059>.

УДК: 547.371:547.372

М.Б. Йулдошева, базовый докторант;
С.Ш. Шарипов, PhD, зав. кафедрой
(НГГТУ, г. Навои, Узбекистан)

ГЛАУКОНИТ – ОСОБО ВАЖНЫЙ МИНЕРАЛ В НАРОДНОМ ХОЯЙСТВЕ

Пигментные компоненты стали частью нашей повседневной жизни. Сегодня во всем мире спрос на пигментные резко увеличивается, так как цветовая матрица составляет неотъемлемую часть среды обитания человека. По своим свойствам имеются разные варианты классификации пигментирующих компонентов. Одной из категорий таких композиций является неорганические пигменты. Достоинством неорганических пигментных композиций является минеральность и доступность отдельных их типов. Среди неорганических минералов особый интерес представляет собой глауконит. Так как данный минерал без сложной обработки может применяться не только как пигмен-

тирующая вещество, но и может стать сорбентом и удобрением. В данной работе обзорно изучены области применения минерала глауконита.

В работе [1] изучена возможность получения глауконитсодержащих удобрений на основе глауконита Каракалпакстана, с азотными и калийными удобрениями. На основании полученных данных установлены оптимальные параметры получения сложных удобрений, состоящих из глауконита и удобрительных солей. Также были изучены физико-механические и товарные характеристики полученных глауконитсодержащих сложных удобрений. При внесении полученных глауконит содержащих удобрений на основе местного сырья структура почвы заметно улучшается, при этом экономятся дорогостоящие минеральные удобрения на 30–35%.

В работе [2] описаны моменты создания технологической схемы получения глауконитового концентрата из вмещающих пород и оценка возможности использования этого концентрата в сельском хозяйстве для повышения инвестиционной привлекательности Бакчарского месторождения глауконитов. В пределах Бакчарского месторождения среди глауконитсодержащих пород выделяются глауконитовые руды (глауконитолиты), глауконитовые песчаники, гидрогетит-хлоритовые железные руды с глауконитом. Содержание полезного компонента (глауконита) в глауконитовых рудах составляет 50...70 %, в глауконитовых песчаниках 20...40 %, в гидрогетит-хлоритовых рудах достигает 10...20 %. В работе установлено, что наиболее качественный продукт с содержанием полезного компонента 90...100 % извлекается из глауконитовых руд.

В описываемых исследованиях [3] представлены результаты исследований химико-минералогического и фракционного составов, а также физико-химических свойств глауконитовых песчаников месторождения Чанги. Были выбраны методы обогащения и проведена термическая активация, исследованы красящие свойства, укрывистость и маслосъемкость полученных коричневых и зеленых пигментов. Было установлено, что глауконитовый песчаник может быть использован в качестве сырья для производства красящих пигментов в промышленности строительных материалов и производстве керамической глазури на предприятиях Узбекистана.

На основе природного глауконита получены также сорбенты для удаления масла и нефтепродуктов с различных поверхностей. Глауконит является алюмосиликатным минералом и широко используется для очистки воды и почвы от различных загрязнений. Для этого сорбент в работе был термически активирован и модифицирован с использованием органических соединений. Образцы глауконита были термически обработаны при температурах 100, 600 и 1000°C. Чтобы

придать глаукониту гидрофобные свойства, его модифицировали стеариновой кислотой. Когда сорбенты вступили в контакт с водой (продолжительность 92 ч), было обнаружено, что при массовой доле стеариновой кислоты 5 мас. % наблюдалась наименьшая потеря массы во всех трех образцах. Гранулированный сорбент, термически активированный при температуре 1000 °С и модифицированный целлюлозосодержащим компонентом, сорбировал масло в течение 2 мин. Использование этого модификатора увеличивало пористость сорбента, что влияло на скорость сорбции.

Представлены результаты [5] исследования глауконита, полученного из отходов фосфоритовой руды. Целью работы являлся изучение морфологических, структурных и химических характеристик глауконита и определение потенциала вторичного использования отходов горнодобывающей промышленности в сельскохозяйственном секторе. Для получения глауконитового концентрата использовался метод электромагнитной сепарации. Глауконит практически всегда содержит включения пирита и апатита, которые значительно улучшают характеристики удобрения. Лабораторные эксперименты показали, что отходы глауконита и глауконитовый концентрат оказывают положительное влияние на рост и развитие растений. Использование такого удобрения особенно ценно на кислых почвах, где апатит может растворяться, делая фосфор доступным для растений. Это питательное вещество дополнительно способствует росту растений, а также снижает риск накопления тяжелых металлов в почве.

В свете вышеизложенного можно констатировать, что глауконит – это особо важный минерал во всех сферах народного хозяйства. Изучение пигментирующих свойств глауконитов Узбекистана, параллельно другими областями применения будут основными направлениями исследования в будущих этапах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алланиязов Д.О., Эркаев А.У., Алламбергенова Р.О., Тажибаев Т.А. Исследование процесса получения сложных удобрений на основе глауконитов (Крантауского месторождения) Каракалпакстана // *Universum: технические науки*. 2021. №8-2 (89). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssessa-polucheniya-slozhnyh-udobreniy-na-osnove-glaukonitov-krantauskogo-mestorozhdeniya-karakalpakstana> (дата обращения: 19.01.2025).
2. Рудмин М.А., Мазуров А.К., Макаров Б.И., Галиханов А.В., Стеблецов М.Д., Чепала К.К. О возможности использования в сельском хозяйстве глауконита из пород Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // *Известия ТПУ*. 2016. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-ispolzovaniya-v-selskom->

hozyaystve-glaukonita-iz-porod-bakcharskogo-mestorozhdeniya-zapadnaya-sibir (дата обращения: 19.01.2025).

3. Rakesh S., & Ravinder, Juttu & Kamalakar, J & Raju, Dr. (2020). Glaucanite: An Indigenous and Alternative Source of Potassium Fertilizer for Sustainable Agriculture. International Journal of Bioresource Science. 7(1). P. 17-19.

4. Yurii S. Peregudov, Rami Mejri, Elena M. Gorbunova, Sabukhi I. Niftaliev Glaucanite-Based Sorbents for Skimming Oil and Oil Products // Конденсированные среды и межфазные границы. 2020. №2 (eng). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/glaucanite-based-sorbents-for-skimming-oil-and-oil-products> (дата обращения: 19.01.2025).

5. Kalinina N, Maximov P, Makarov B, Dasi E, Rudmin M. Characterisation and Environmental Significance of Glaucanite from Mining Waste of the Egorievsk Phosphorite Deposit. Minerals. 2023; 13(9):1228. <https://doi.org/10.3390/min13091228>

УДК 628.4

B.T. Koshanova, A.U. Erkaev, A.B. Toshtemirov, A.N. Bobokulov
(Department of Chemical Technologies of Inorganic Substances, Tashkent
Chemical Technology Institute, Tashkent, Узбекистан);
L.S. Eshchenko (Belarusian State Technological University, Minsk)

STUDY OF THE COMPOSITION OF WASTE SULFURIC ACID FROM THE PVC PLANTS AT JSC «NAVOIAZOT»

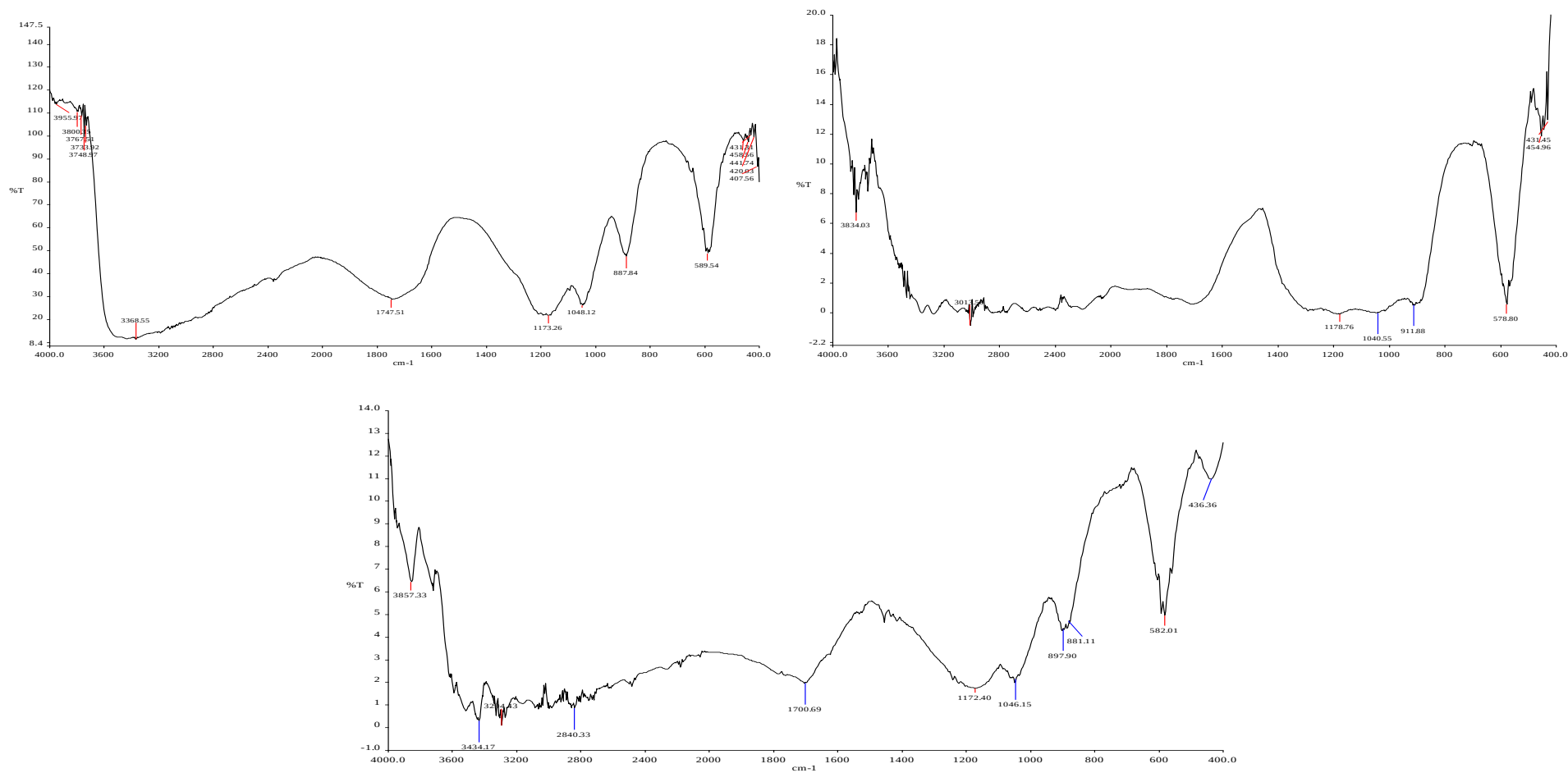
Sulfuric acid is crucial in many industries, including the production of fertilizers, petrochemicals, and metal refining. Its widespread use demands effective treatment and recycling methods to mitigate its hazardous effects.

Due to its highly corrosive nature, sulfuric acid requires careful handling and treatment. The disposal and neutralization of sulfuric acid waste are particularly challenging, necessitating advanced treatment technologies.

The goal of our work is to develop methods for processing sulfuric acid waste and fertilizer production technology.

In this work, the temperature, pressure, change in volume and density of acid waste from caustic soda and PVC (polyvinyl chloride) plants (Pos. V240002; Pos. V260015; Pos. V260015; Pos. 909) at JSC "NAVOIYAZOT" are studied. their status; we will study the composition of the fertilizer obtained as a result of processing, the conditions of its use and plant absorption, temperature, pressure, reactions to external influences, and the scientific results of the creation of production technology.

Several methods exist for treating sulfuric acid, each suitable for different industrial contexts.



Here: 1 – plants 910 pos. 24000; 2 – plants 910 pos. 26000; 3 – plants 909

Figure 1 – IR-spectra of sulfuric acid samples of primary effluents from plants 910 and 909.

The choice of treatment method depends on factors such as the concentration of sulfuric acid, the presence of contaminants, and the intended use of the treated acid.

The chemical compositions of these acids from different workshops were the very first to be studied (Table 1).

Table 1 – The chemical compositions and refractive index acid waste of caustic soda and PVC (polyvinyl chloride) plants (Pos. V240002; Pos. V260015; Pos. V260015; Pos. 909) from JSC "NAVOIYAZOT"

Sam- ple№	Samples to be named plants	Chemical composition								refractive index, at 28°C
		Mass. %				Volume, g/l (at 20°C)				
		H ₂ SO ₄	H ₂ O	Cl ₂	Organic part	H ₂ SO ₄	H ₂ O	Cl ₂	Organic part	
1	910 pos. V240002	77,80	21,76	0,44	-	1318,7	368,83	7,51	0	1,4288
2	910 pos. V260015	97,52	2,34	0,14	-	1793,3	43,03	2,48	0	1,4297
3	909	84,73	6,75	-	8,52	1429,4	113,87	0	143,73	-

The IR spectroscopic analysis method was used to determine the type of organic compound in the initial samples and the results are shown in Figure 1.

According to the analysis of the curve of the IR spectrum of the samples of the primary waste of sulfuric acid, 710.8 cm⁻¹ is characteristic of the C-Cl valence bond of acid and water in the 1st sample, and in addition to sulfuric acid and water in the second sample. At 1, a new intensity of the absorption bands is observed. This confirms the presence of chlorosulfonic acid -HSO₃Cl in the second sample (plants -910, pos. 260015).

The IR-spectrum of the third sample is complex, that is, the limiting and unsaturated range of the class of organic compounds: from simple alcohol, ketones, carboxylic acids to simple and ethers.

Having identified the groups of organic compounds, we can then select a comprehensive method for processing waste sulfuric acid, including neutralization of sulfuric acid, separation of organic and inorganic components and their intended use.

REFERENCES

1. Hughes, T.A.; Gray, N.F. Removal of metals and acidity from acid mine drainage using municipal wastewater and activated sludge. *Mine Water Environ.* 2013, 32.
2. López, J.; Gibert, O.; Cortina, J. Integration of membrane technologies to enhance the sustainability in the treatment of metalcontaining acidic liquid wastes. An overview. *Sep. Purif. Technol.* 2021, 265.
3. Merkel, A.; Ashrafi, A.M.; Ondrušek, M. The use of electrodialysis for recovery of sodium hydroxide from the high alkaline solution as a model of mercerization wastewater. *J. Water Process. Eng.* 2017, 20.

Б.С. Мамарасулов, Б.Т. Кошанова, А.У. Эркаев
(Ташкентский химико-технологический институт, г.Ташкент, Узбекистан);

А.У. Абдурахимова
(Ташкентский филиал Российского химико-технологического
университета им. Д.И. Менделеева, г. Ташкент, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ХЛОРИДА КАЛЬЦИЯ, ПРИГОДНОГО ДЛЯ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В данной работе испытывали возможность применения отхода производства ООО СП «Кунградский содовый завод» – дистиллерную жидкость.

Известно, что одним из основных способов сокращения отходов хлора в процессе производства соды является получение продуктов путем их переработки. На сегодняшний день существуют направления решения проблемы утилизации отходов, такие как получение хлоридов кальция и натрия из застойных взвесей, использование их в качестве мелиорантов в нефтяной и газовой промышленности (рекультивация нефтезагрязненных болотных почв модифицированными мелиорантами) и получение гидроксида кальция, а также бесцементное вяжущее и другие продукты [1–3].

Растворы хлористого кальция представляют собой эффективное и экономичное средство для абсорбции водяного пара в различных промышленных процессах. Их высокая гигроскопичность, доступность и простота регенерации делают их незаменимыми в системах осушки. Однако для достижения максимальной эффективности требуется учитывать такие факторы, как концентрация раствора, температура процесса и возможные риски коррозии.

Опыты проводились с дистиллерной жидкостью следующего состава (г/л): 26,92 – Na^+ ; 37,07 – Ca^{2+} ; 99,98 – Cl^- ; 0,30 – SO_4^{2-} ; 1,01 – 2 OH^- ; плотность – 1,133 г/см³.

Для разработки стадий разделения образующихся солевых осадков изучали процессы их седиментации и фильтрации суспензии в зависимости от температуры и соотношения Ж:Т. Упарку раствора продолжали до достижения содержания CaCl_2 40–45%, поскольку дальнейшее повышение концентрации не влияет на содержание хлорида натрия в жидкой фазе. С повышением концентрации CaCl_2 раствор становится более вязким, что затрудняло осаждение и фильтрацию кристаллов хлорида натрия. Поэтому предлагаем проводить процесс упарки в две стадии. Первая стадия продолжается до содержания хлорида кальция 45% и после отделения кристаллов начинается вторая

стадия. Поэтому процесс седиментации и фильтрации проводили при 80⁰С.

Как показал седиментационный анализ, при отстаивании могут образоваться соляные суспензии с Ж:Т=1:1–5:1 в течении 10 мин и солевая суспензия, образующаяся при упарке дистиллерной жидкости до 45%, быстро декантируется и легко фильтруется (таблица 1).

Таблица 1 – Скорость фильтрации суспензии, образующейся при упарке дистиллерной жидкости

№ опы- тов	Соот- но- шение Ж:Т	При 20 °С				При 80 °С			
		скорость филь- трации, кг/м ² ·ч		ρ, г/см	η, мПа с	скорость филь- трации, кг/м ² ·ч		ρ, г/см	η, мПа с
		по твер- дому осадку	по жид- кой фазе			по твер- дому осадку	по жид- кой фа- зе		
1	5:1	191,8	938,5	1,40	210,0	225,89	1207,5	1,38	150,0
2	4:1	205,11	825,28	1,42	220,5	315,05	1431,0	1,39	180,4
3	2:1	239,4	483,01	1,48	410,4	347,92	747,40	1,460	210,1
4	1:1	240	233	1,59	1590,1	426,3	360,9	1,570	1290

Таким образом, мы получили растворы с концентрацией 30, 40 и 50% и плавленые таблетированные продукты хлорида кальция с диаметром частиц -4 ÷ +3; -3 ÷ +1; -1 ÷ +0,5, пригодные для осушки природного газа (рис.1).



Диаметр частиц больше +5



Диаметр частиц -4+3



Диаметр частиц -3+1



Диаметр частиц -1+0,5

Рисунок 1 – Фотография образцов хлорида кальция, пригодных для применения при осушки природного газа

Таким образом, производство таблетированного хлорида кальция включает следующие этапы:

1. Очищение и сушка порошка CaCl_2 для достижения оптимального содержания влаги.
2. Прессование порошка прессуется в формы с обеспечением заданных размеров и плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткач Г.А., Шапоров В.П., Титов В.М. Производство соды по малоотходной технологии. Харьков: ХГПУ. – 1998. – 429 с.
2. Реймов К.Д., Эркаев А.У. Исследование процесса утилизации дистиллерной жидкости-отхода производства УП «Кунградский содовый завод» // Умидли кимегарлар: Тез. докл. научн. техн. конф.- Ташкент, 2008.
3. Рамбергенов А.К. Разработка технологии производства кальцинированной соды из низкоконцентрированного печного газа. – Дисс. канд. техн. наук – Ташкент, 2009. – 174 с.

УДК:661.632

А.Н. Бобокулов, А.У. Эркаев, Б.Т. Кошанова
(Ташкентский химико-технологический институт, г.Ташкент, Узбекистан);

Д.З. Эшметова
(Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных
технических квалификаций, г. Ташкент, Узбекистан);

А.Н. Гаврилюк (БГТУ, Беларусь)
e-mail: kafedranmkt@mail.ru тел.+998970074774

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ KN_2PO_4

При получении дигидрофосфата калия из хлорида калия с использованием термической фосфорной кислоты и диэтиламина по аминному методу, дигидрофосфат калия выпадает в осадок в твердую фазу. [1-4]. При изучении химического состава жидкой фазы было обнаружено, что в ее составе остались некоторые количества оксидов калия и фосфора. Содержание жидкой фазы, в масс. %: K_2O - 1.988; P_2O_5 - 5.08; Cl_2 - 6.01; ДЭА - 15.4 и H_2O - 71,522.

Теоретически в результате реакции в жидкой фазе образуется гидрохлорид диэтиламина, но если останется часть непрореагировавшего исходного компонента, то он останется в жидкой фазе.

Что бы осадить солей, содержащихся в жидкой фазе в твердую фазу, выпаривали насыщенный раствор на разных уровнях. При этом определялись технологические параметры, влияющие на процесс упа-

ривания. К ним относятся скорость фильтрации, показатели pH, преломления, плотности и вязкости (табл. 1-2).

Таблица 1 – Влияние технологических параметров на процесс испарения образующейся жидкой фазы при получении KN_2PO_4

№	С, %	pH	Показатель преломления света, n^{20}	Т.Ф. %	Время фильтрации, секунды	Скорость фильтрации, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$	
						Ж.Ф.	Т.Ф.
1	10	7,18	1,3816	1.43	34,16	2054,71	33,16
2	20	7.39	1,3831	2,75	28.89	2106.24	78,37
3	30	7,61	1,3909	5.27	20.57	3095,74	261,41
4	40	7,65	1,3950	7.25	10.61	5361,64	773,57
5	45	7,83	1,4018	9,5 0	8.37	5782,13	1284,91

Как видно из таблицы 1, при упаривании насыщенного раствора в диапазоне от 10% до 45% твердая фаза отделялась от 1,43% до 9,50% по сравнению с выпаренной жидкой фазой.

Таблица 2 – Реологические показатели жидкой фазы, образующейся в процессе получения KN_2PO_4 при различных степенях испарения

№	С, %	Плотность, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$				Вязкость, $\text{мм}^2/\text{сек}$			
		20	40 ⁰	60 ⁰	80 ⁰	20 ⁰	40	60	80
1	10	1066	1062	1054	1045	22:13	18:32	13:17	12:13
2	20	1064	1058	1051	1043	24:43	19:97	16:89	13:04
3	30	1062	1056	1048	1038	27:34	21:86	17:16	13:63
4	40	1054	1043	1037	1029	30:81	26:73	17:93	14:19
5	45	1046	1034	1028	1016	31:35	29:54	18:40	17:52

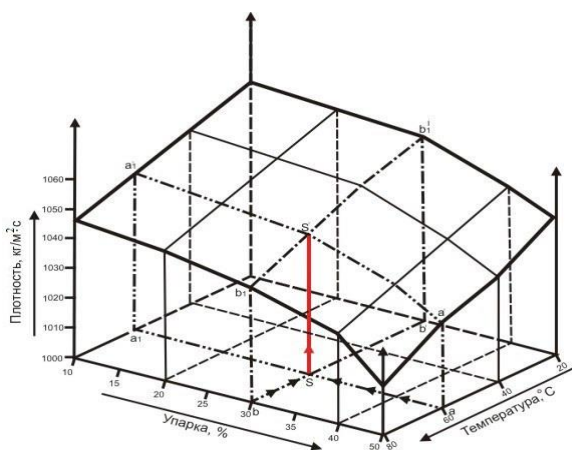


Рисунок 1 – Показатели плотности жидкой фазы, образующейся в процессе получения дигидрофосфата калия при различных степенях испарения

После фильтрации оставшейся твердую фазу сушили в сушильном шкафу при температуре 105, в течении 2 часов. Высушенного остатка подвергали к рентгеноструктурному анализу. Результаты, которые приведены в рисунке 2.

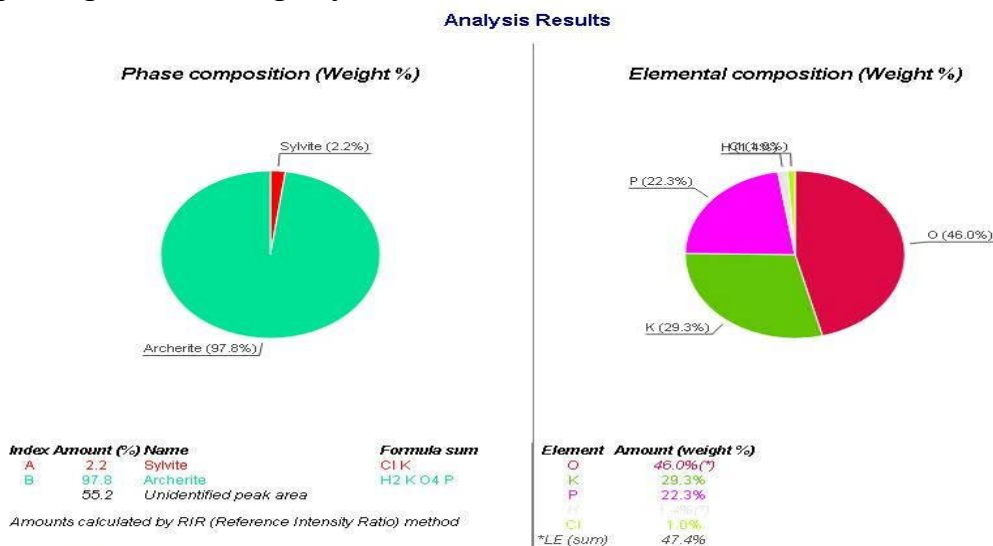


Рисунок 2 – Твердофазное рентгеновское изображение, полученное при 30% испарении насыщенного раствора

Из рентгеноструктурного анализа твердой фазы видно, что при 30%-ом выпаривании жидкой фазы в твердую фазу отделяется дигидрофосфат калия, а при испарении 40-45% в твердую фазу выпадает диэтиламинагидрохлорид вместе с дигидрофосфатом калия.

Таким образом, выпаривая жидкую фазу до 30%, можно дополнительно выделить продукт – дигидрофосфат калия, который также влияет на выход продукта, увеличивая его до 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Позин М. Е. Технология минеральных удобрений. Л.: Химия, 1983.
2. Соловьева А. Н., Шокин И. Н., Яхонтова Е. Л. // Химия и химическая технология: сб. аспирантов и соискателей. Алма-Ата. 1967. Вып. 6. С. 206–211.
3. Мазунин С. А., Чечулин В. Л., Фролова С. А., Кистанова Н. С. Технология получения дигидрофосфата калия в системе с высаливанием // Химическая промышленность. 2010. №1. С. 6-15.
4. A. Bobokulov, A. Erkaev, Z. Toirov, M. Axmadova, and D. Eshmetova / Research of the process of obtaining potassium dihydrophosphate using diethylamine, E3S Web of Conferences 458, 02035 (2023) EMMFT-2023

Р.Э. Тошкодирова, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
С.А. Кенжаева, докторант кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
(Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического
университета им. Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ ИЗ КЛИНКЕРА ЦИНКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Клинкер является техногенным отходом цинкового производства, который содержит цветные и благородные металлы. Клинкер характеризуется сложным химико-минералогическим составом. Химический состав заводов различный. Содержание элементов в среднем, мас. %: 0,83–3,56 Zn; 0,62–4,10 Cu; 0,41–2,18 Pb; 15–25 Fe, кокс-20–30 % а также благородные металлы, свободный углерод (кокс), кремнезем, CaO, MgO, глинозем. Кроме этого, в составе клинкера имеются и редкие металлы, такие как литий, барий, титан, вольфрам, ванадий, молибден. Ежегодно при переработке сырья на цинковом заводе прирост клинкера увеличивается на 25–30 тонн в год. С момента эксплуатации цинкового завода на сегодняшний день накопилось около 500 тысяч тонн клинкера.

Создание технологии комплексного извлечения металлов из состава клинкера является одной из основных и проблемных задач ученых современности. Схема, разработанная С.М. Авдюимовым с сотрудниками, состояла из комбинированного обогащения клинкера с отстаиванием и магнитной сепарацией, но не была успешной, так как не обеспечивала разделения компонентов методом обогащения, поскольку компоненты распределяются по всем продуктам. По методу Мостовича (отсадка, магнитная сепарация или флотация) можно увеличить количество цветных металлов, но будет снижаться извлечение благородных металлов [1].

Способ извлечения из клинкера меди и цинка в виде сульфатного раствора, состоит в том, что его направляют в цинковое производство, а получающийся кек сульфата свинца отгружают в свинцовое производство. Способ включает обжиг с хлоринатором CaCl_2 с выделением возгонов хлоридов цветных металлов, солянокислым их орошением и осаждением гидратного кека цветных металлов нейтрализацией растворов мокрого улавливания возгонов известью. Основными недостатками способа являются потери благородных металлов с отвальным огарком, сложность и много стадийность схемы, связанные с использованием хлорид-возгонки и солянокислого мокрого улавливания возгонов, применение дорогого и дефицитного компонента –

соляной кислоты, требующей также особых мер техники безопасности [2]. Новый метод переработки включающий низкотемпературный сульфатизирующий обжиг клинкера, позволяющий трансформировать «упорные» минералы в растворимые сульфатные соли меди и цинка, которые аммиачным выщелачиванием селективно извлекаются в раствор в виде стойких аммиаков $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ и $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$. При этом железо в виде $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и основная часть свинца в виде PbSO_4 остаются в кеке [3].

Анализ существующих методов переработки клинкера показывает, что еще не существует технологии, которая позволяет комплексно извлекать ценные компоненты из состава клинкера, а значит проблема по переработке клинкера еще не решена.

Целью исследования является изучение возможности извлечения ценных компонентов из клинкера цинкового производства.

Согласно химическому и пробирному анализу в составе клинкера имеются нижеследующие редкие и благородные металлы (%): 0,00971 In, 5,86 Ba, 0,3798 Ti, 0,0138 V, 0,036 Mo, 0,013 W, 0,00102 Au. Для исследования извлечения редких металлов из клинкера были проведены лабораторные исследования. Последовательность выполнения опытов приведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Схема извлечения редких металлов из клинкера

В данной технологии клинкер измельчается до крупности 1 мм и подвергается магнитному обогащению с целью извлечения железа в отдельный продукт. После обогащения получается два продукта: магнитная фракция и хвосты. Магнитная фракция содержит более 60 %

железа и можно ее использовать в промышленности. Результаты магнитной сепарации приведены в таблице №1.

Таблица 1 – Результаты магнитной сепарации клинкера

Название	In	Ba	Ti	V	Mo	W	Au
Немагнитная фракция	0,00401	3,68	0,1898	0,0048	0,013	0,005	0,001
Магнитная фракция	0,0057	2,18	0,19	0,009	0,023	0,008	0,00002

Результаты показывают, что редкие металлы относительно равномерно распределяются по обоим продуктам магнитного обогащения. Это исследование проведено с целью снижения влияния железа на процесс выщелачивания. В работе клинкер массой 1 кг был подвержен дроблению и далее ситовому и гранулометрическому анализам. Была проведена магнитная сепарация навески по 100 г с разными частотами от 0,5А до 2,5А общей массой 500 грамм.

Хвосты магнитной сепарации подвергались выщелачиванию в растворе концентрации 30 % HCl (200 мл) при температуре 50–70 °С. В результате выщелачивания были получены три продукта: легкая фракция, раствор и кек.

Нами при различных температурах проведены опыты по выщелачиванию немагнитной фракции клинкера с целью перевода редких металлов в раствор. При температуре 50°С были получены следующие результаты. Химический анализ показал, что в составе кека содержится (г/т): 0,00444 In, 0,00516 Ba, 0,04551 Ti, 0,00486 V, 0,00898 Mo, 0,0010 W. Также получена легкая фракция (г/т): 0,00502 In, 0,00705 Ba, 0,08139 Ti, 0,00421 V, 0,01676 Mo, 0,00316 W. Из-за перехода железа в раствор и образования осадков химический состав раствора установить не удалось. Проведены опыты по выщелачиванию при температуре 70 °С и были получены нижеследующие результаты. Химический анализ показал, что в составе кека (г/т): 0,00442 In, 0,00555 Ba, 0,03228 Ti, 0,00349 V, 0,00738 Mo, 0,00088 W. Также было получена легкая фракция, включающая (г/т): 0,00371 In, 0,00596 Ba, 0,06295 Ti, 0,00359 V, 0,01450 Mo, 0,00305 W. Из-за перехода железа в раствор и образования осадков химический состав раствора определить не удалось.

Опыты показали, что в легкой фракции в основном содержатся углерод, который может быть коллектором металлов. Поэтому было решено провести опыты в другом составе клинкера. Были проведены опыты с другим обезуглероженным клинкером, в составе которого редкие металлы составили (г/т): 0,0008 Li, 0,01 In, 0,0011 Ge.

Опыты были проведены при температуре 70 °С, при этом выщелачиванию подвергались и магнитная и немагнитная фракции. В

результате выщелачивания не наблюдалось образование легкой фракции. Химический анализ раствора показал, что в раствор перешел только индий в количестве 253 мг/л. Идий и германий в растворе не обнаружены.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что для извлечения редких металлов из состава клинкера выщелачивание соляной кислотой не дает положительных результатов. Применение серной кислоты неэффективно вследствие образования кремниевой кислоты, которая мешает процессу извлечения металлов в раствор. Поэтому есть необходимость проводить исследования по извлечению редких металлов другим способом, таким как электрохлоринация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лакерник М.М., Пахомова Г.Н. Металлургия цинка и кадмия. – М.: Металлургия, 1969. – 520 с.
2. Вестник ООО "Медногорский медно-серный комбинат" (RU).
3. Букульбаева Н.С., Эдилканова М.Э., Кокаева Г.А. Обзор технологий переработки клинкера вельц печей // Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева. – 2023. – №2. – С. 45–52.

УДК: 661.152.32

М.Б. Мавлянов

(Ташкентский химико-технологический институт, Янгийерский филиал);

А.У. Эркаев, М.Ш. Адилова, А.Н. Бобокулов

(Ташкентский химико-технологический институт, г.Ташкент, Узбекистан)

E-mail: kafedranmkt@mail.ru тел: (97) 0074774

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГАЛУРГИЧЕСКОГО СПОСОБА ОБОГАЩЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУД ТЮБЕГАТАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Основным целевым продуктом калийной промышленности является хлорид калия (KCl), который может служить как в качестве самостоятельного удобрения, так и сырьем для получения калиевых солей – сульфата, карбоната, нитрата и др. Кроме этого, соли калия входят в состав некоторых сложных удобрений, например, нитроаммофоски и аммофоски (NPK удобрения), содержащих три питательных элемента: фосфор, азот и калий.

Сырьем для получения хлорида калия в Узбекистане служат сильвинитовые руды месторождения Тюбегатан. Запасы калийного сырья в Узбекистане оцениваются миллионами тонн (в пересчете на K₂O). Наличие запасов калийных солей и потребность в калийных

удобрениях обуславливают и необходимость переработки руды. Промышленными методами производства хлорида калия из сильвинита в основном являются флотационный и галургический.

В настоящее время на большинстве фабрик перерабатывающих сильвинитовые руды в хлористый калий с применением флотационного способа. Однако применение флотации при значительном содержании в руде нерастворимого остатка приводит к повышенному расходу реагентов и снижению извлечения калия в конечный продукт. Кроме того, известны случаи, когда хлористый калий, получаемый по флотационному способу и содержащий значительное количество нерастворимых примесей, слеживался, причем применение известных методов борьбы с этим свойством не давало положительных результатов [1–3].

При переработке сильвинитов галургическим способом шламы не вызывают таких затруднений, наблюдается более высокая степень использования сырья, особенно при переработке низкосортных калийных руд, с высоким содержанием нерастворимого остатка.

При применении галургического способа можно получить хлорид калия высокой 99%-ной концентрации. И при этом образуется чистый хлорид натрия, который можно использовать как пищевую соль или для получения различных натрийсодержащих веществ. Проведен теоретический анализ галургического способа обогащения калийных руд Тюбегатанского месторождения на основе диаграммы растворимости $KCl-NaCl-H_2O$ при температурах 25 и 100°C.

В качестве исследования взяты 5 образцов сильвинита, содержащего, KCl , мас. %: 1 – 9,2, 2 – 13,2, 3 – 18,3, 4 – 26,1, 5 – 31,1.

Для проведения графического анализа в тройной системе без учета н.о. сумму KCl и $NaCl$ принимаем 100%, исходное содержание сырья ($A_1, A_2...A_5$) были введены в фигуративные точки $KCl-NaCl$ координат бинарных твердых солей диаграммы $KCl-NaCl-H_2O$ (рис. 1).

Процесс растворения осуществлялся в двух вариантах: в первом варианте образцы растворяли в чистой воде, во втором в смеси воды и раствора M^{25} (1 : 1). Варианты осуществлялись двумя способами растворимости: полной и частичной.

По графическим расчетам видно, что при растворении по первому варианту (рис. 1) способом полного растворения (25 °C) с увеличением содержания KCl от 9,2 до 31,1% в сильвините снижается расход потребляемой воды с 2,66 до 1,94 т на тонну сильвинита для получения насыщенного раствора, в то время как при 100 °C расход воды снижается с 2,37 до 1,91 т. Когда процесс растворения

проводится при температуре 100 °С, расход воды меньше на 0,03–0,29 т, чем было бы необходимо для растворения образцов при температуре 25 °С. Полученные растворы очищаются от нерастворимых компонентов и изотермически выпариваются при 25 и 100°С, соответственно. Испарение прозрачных растворов продолжается до тех пор, пока лучи не пересекут поперечные сечения BE_{25} и BE_{100} .

В результате выпаривания первоначально в обеих изотермах кристаллизуется NaCl. С точки зрения энергосбережения, руда с содержанием менее 18,3 % KCl, полностью растворяется при 25 °С, испаряя 40–60 % воды, 41,1–58,3 % NaCl отделяется от общей массы сильвинита, а фильтрат с температурой 100 °С направляется на частичное растворение более концентрированный (18,3%) по KCl сильвинита. Шлам и фильтрат, из которого отделяются кристаллы NaCl, охлаждают до 25 °С и отделяют 94–96 % KCl из сильвинита.

При этом, количество воды, которое необходимо выпарить для насыщения раствора увеличивается с 2,19; 0,95 и 0,34 до 3,7; 2,25 и 0,41, т.е. в 1,03, 2,37 и 1,20 раза (при 25°С), соответственно. Однако, при 100 °С оно увеличивается с 2,21; 1,87 и 1,37 до 3,36; 2,61 и 1,9, то есть в 1,52; 1,39 и 1,38 раза.

В соответствие с вышеизложенным количество хлорида натрия, которое кристаллизуется во время испарения при 25 °С, уменьшается с 0,75; 0,57 и 0,19 до 0,70; 0,42 и 0,08, т.е. снижается в 1,42; 1,43 и 1,6 раза соответственно.

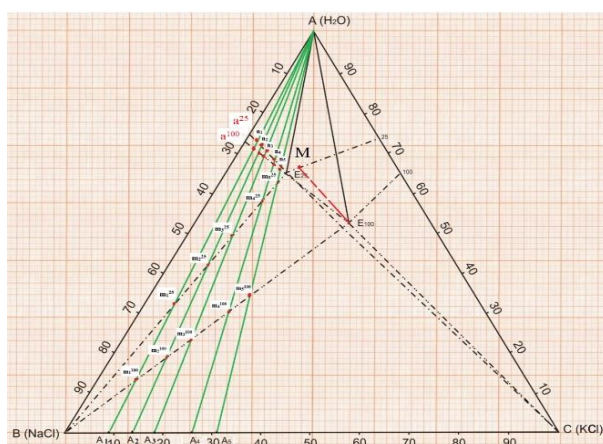


Рисунок – Графический расчет по первому варианту на основе диаграммы растворимости системы KCl–NaCl–H₂O

Также необходимо отметить, что если раствор, полученный при 100 °С, охладить до 25 °С, то в раствор, соответственно, выделяется 0,059; 0,115; 0,203 и 0,117; 0,205 и 0,310 т хлорида калия. При способе полного растворения по варианту 2 выход NaCl из выпаренного

раствора (при 100 °C) выше, чем в первом варианте: с 0,80; 0,73 и 0,53 повышается до 1,49; 1,10 и 0,75 т, т.е. в 1,86; 1,92 и 1,41 раза выход больше. При способе растворения выход чистой поваренной соли (хлорида натрия) и хлорида калия увеличиваются по сравнению с вариантом 1. На основе теоретического анализа предложена принципиальная схема комплексной переработки низкосортных сильвинитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mavlyanov M.B., Erkayev A.U., Adilova M.SH. Study of Low Silvinite Enrichment Process in Tubegatan Deposit // Published by: International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Asian Journal of Multidimensional Research, ISSN: 2350-0328, Vol 8, Issue 9, September 2021. India. – P. 18237–18241.

2. Мавлянов М.Б., Адилова М.Ш., Эркаев А.У. Изучение процесса получения хлорида калия галургическим способом из сильвинита Тюбегатанского месторождения // «Universum: технические науки» Выпуск: 11(104) ноябрь, 2022. С.30-38.

3. Mavlyanov M.B., Bekchanov B.B., Adilova M.SH., Erkayev A.U. Study of the chemical and mineralogical composition of potassium ores of tubegatan mine // Science and innovation international scientific journal, Vol 2, Issue 25 October 2023. – P. 81–87.

УДК 669.872

Д.Б. Холикулов, д-р техн. наук, проф.,
зам. директора по научной работе и инновациям;
Х.Р. Хайдаралиев, докторант кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
С.С. Муталибхонов, ст. преп. кафедры «Металлургия»
(Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического
университета им. Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ФЕРРИТА ЦИНКА СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРАЗИНА СУЛЬФАТА

Феррит цинка (ZnFe_2O_4) представляет собой один из основных компонентов отходов гидрометаллургических процессов [1]. Наличие цинкового феррита затрудняет переработку цинкового кека. Он образуется при обжиге цинкового концентрата и препятствует полному переходу цинка в раствор при обработке серной кислотой. Стабильность феррита цинка усложняет извлечение металла [2]. Эффективная переработка феррита цинка позволяет извлекать цинк и железо, что

имеет важное значение для металлургической промышленности [3]. Использование серной кислоты для выщелачивания феррита цинка широко изучено, однако добавление восстановителей, таких как гидразин сульфат ($\text{N}_2\text{H}_6\text{SO}_4$), может значительно улучшить процесс выщелачивания.

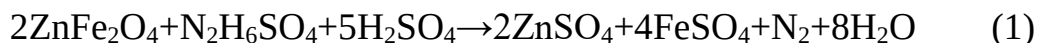
В этом исследовании [4] изучено разработку экологически чистой и экономически выгодной технологии извлечения металлов из цинкового кека с использованием гидразина для разложения цинк-феррита. Гидразин восстанавливает железо (III) в цинк-феррите до железа (II), выделяя азот в виде газа, а кислород связывается с водородом гидразина, образуя воду. Экономическая выгода обеспечивается эффективной диффузией гидразина в растворах, его нетоксичностью и низкой стоимостью по сравнению с углеродсодержащими восстановителями.

Авторы работы [5] исследовали остатки нейтрального выщелачивания руды, содержащие значительные количества кадмия (Cd) и цинка (Zn), представляющие угрозу для окружающей среды. Процесс восстановительного выщелачивания с использованием сульфата гидразина показал высокую эффективность извлечения этих элементов при оптимальных условиях.

Сульфат гидразина использовался в качестве восстановителя для выщелачивания лития, никеля, кобальта и марганца из отработанных литий-ионных батарей авторами работы [6]. Оптимальные условия включали определённую концентрацию серной кислоты, дозировку сульфата гидразина, соотношение твёрдое–жидкое, температуру и время выщелачивания. Энергии активации процесса выщелачивания были различными для каждого из элементов: лития, никеля и кобальта.

Целью настоящего исследования является термодинамический анализ процесса выщелачивания феррита цинка с серной кислотой в присутствии гидразина сульфата.

Процесс выщелачивания феррита цинка включает сложные реакции между компонентами:



Термодинамический анализ включает расчет стандартных значений энтальпии (ΔH), энтропии (ΔS) и свободной энергии Гиббса (ΔG) для этих реакций. Отрицательное значение ΔG указывает на термодинамическую возможность протекания реакции. Термодинамический анализ реакции был проведён в интервале температур 298–368 К (25–95 °C). При этом рассмотрено влияние температуры системы на энергию Гиббса реакции, а результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свободная энергия Гиббса (ΔG) в зависимости от температуры

Температура (Т)		ΔG (кДж/моль)
К	°С	
298	25	-1077,918
308	35	-1079,828
318	45	-1081,738
328	55	-1083,648
338	65	-1085,558
348	75	-1087,468
358	85	-1089,378
368	95	-1091,288

Значения ΔG для выщелачивания феррита цинка серной кислотой показывают, что реакция становится более благоприятной при повышении температуры.

Введение гидразина сульфата способствует снижению общего ΔG процесса за счет повышения восстановительной способности среды (рис. 1). Экспериментальные данные подтверждают, что добавление гидразина сульфата приводит к более полному растворению феррита цинка и повышению извлечения цинка до 90–95 %.

Добавление восстановителя ускоряет протекание реакции.

Увеличение температуры дополнительно способствует повышению скорости процесса.

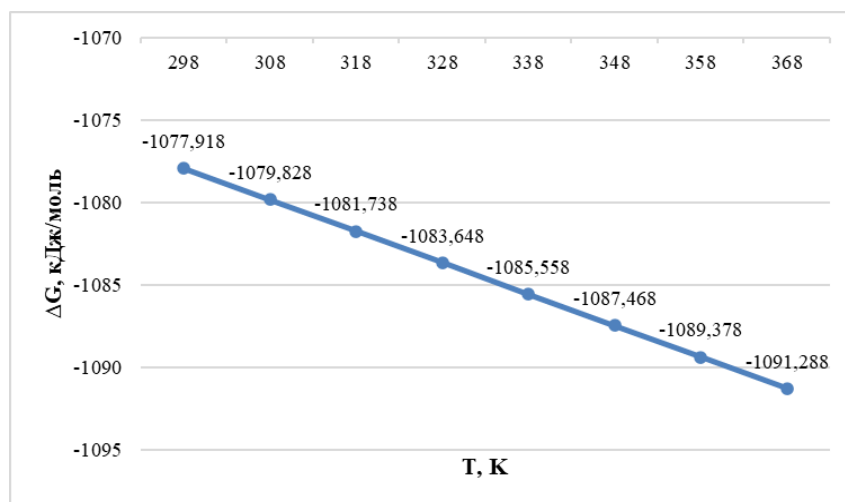


Рисунок 1 – Зависимость свободной энергии Гиббса от температуры для восстановления цинкового феррита с использованием сульфата гидразина

Проведенный термодинамический анализ показал, что использование гидразина сульфата в процессе выщелачивания феррита цинка серной кислотой является термодинамически и кинетически эф-

фективным методом. Это открывает перспективы для дальнейшего внедрения данного подхода в гидрометаллургическую промышленность.

Значение ΔG становится более отрицательным с ростом температуры, что указывает на увеличение термодинамической стабильности реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hojiyev Sh.T., Berdiyarov B.T. Sulfidli rux boyitmasini Qaynar Qatlam pechida kuydirish jarayonida silikatlar va ferritlar hosil bo'lishining oldini olish chora-tadbirlari // "Fan va Texnika taraqqiyotida intellektual yoshlarning o'rni" nomli Respublika ilmiy anjumanining ma'ruzalar to'plami, I qism/ Toshkent: ToshDTU, aprel, 2015. 171 – 174 p.

2. Холикулов Д.Б., Нормуротов Р.И., Хайдарлиев Х.Р., Рузикулов К.М. Гидрометаллургическая переработка цинковых кеков в условиях цинкового завода АО «Алмалыкский ГМК» // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения, – 2021. – С. 17–18.

3. Khaydaraliev K., Karshiyev H., Mamaraximov S. Effect of particle size during leaching of zinc cakes in sulfuric acid // Talqin va Tadqiqotlar. 2023. T. 1. – № 24. – С. 27-31.

4. Khojiev Sh.T., Kholikulov D.B., Toshkodiroya R.E., Khaydaraliev Kh.R. Investigation of the reduction of zinc ferrite with hydrazine: thermodynamic analysis and optimization of process conditions // "Kimyo sanoatining dolzarb muammolari, innovatsion yechimlari va istiqbollari" nomli xalqaro ilmiy-amaliy anjumani to'plami, Olmaliq, 1-2 noyabr, 2024. – С. 288–289.

5. Zhang C., Min X., Zhang J., Wang M., Zhou B., Shen C. Reductive acid leaching of cadmium from zinc neutral leaching residue using hydrazine sulfate // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015. – T. 25. – С. 4175–4182.

6. Yang J., Jiang L., Liu F., Jia M., Lai Y. Reductive acid leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using hydrazine sulfate as reductant // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020. – T. 30. – С. 2256–2264.

Д.Б. Холикулов, проф., д-р техн. наук,
зам. директора по научной работе и инновациям;
Ш.Ж. Худоймуратов, ассист. кафедры «Металлургия»;
О.Н. Болтаев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
(Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического
университета им. Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан)

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ МЕДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Современное развитие металлургической промышленности требует внедрения инновационных технологий, которые направлены на рациональное использование сырьевых ресурсов и минимизацию воздействия на окружающую среду.

В последние десятилетия внимание ученых и инженеров сосредоточено на поиске решений, которые бы позволяли эффективно перерабатывать отходы производства, извлекая из них ценные компоненты и при этом снижая вредное влияние на экосистему. Одной из таких задач является разработка методов извлечения драгоценных металлов из технологических растворов, образующихся при производстве меди.

Технологические растворы, образующиеся в процессе меди, содержат значительные количества драгоценных металлов, таких как золото, серебро, платина и другие, что делает их переработку не только экономически выгодной, но и экологически важной. Эти растворы, как правило, образуются в процессе гидрометаллургической переработки руд, а также в ходе различных технологических операций, связанных с очисткой и экстракцией меди. Однако при обычном процессе нейтрализации и обезвреживания этих растворов они часто направляются на хвостохранилища, что приводит к потере ценных компонентов, таких как золото и серебро (рис. 1).

Важным аспектом проблемы является то, что в таких растворах могут находиться и токсичные вещества, такие как ртуть, кадмий и другие тяжелые металлы, которые, даже в малых концентрациях, оказывают опасное воздействие на экологию и здоровье человека. Эти вещества, оставаясь в процессе, могут загрязнять почву, воду и воздух, что делает необходимым разработку безопасных методов их извлечения и утилизации.

Целью данной работы является изучение существующих методов извлечения драгоценных металлов из технологических растворов

медного производства и разработка рекомендаций по оптимизации этих процессов. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- изучить состав технологических растворов, образующихся при производстве меди, а также идентифицировать основные компоненты, которые могут быть переработаны или извлечены;
- провести сравнительный анализ существующих методов извлечения драгоценных металлов, таких как золото, серебро и платина, из этих растворов, оценив их эффективность и экологическую безопасность и разработать рекомендации по улучшению существующих технологий с целью повышения извлечения драгоценных металлов и снижения воздействия токсичных компонентов на окружающую среду.

Таким образом, задача заключается не только в повышении эффективности процессов переработки технологических растворов, но и в создании более экологически безопасных технологий, которые смогут минимизировать выбросы вредных веществ в природу и обеспечить устойчивое использование ресурсов [1].

Исследование основывалось на комплексном подходе, который включал лабораторные, аналитические и экспериментальные методы. Для анализа состава технологических растворов использовались такие высокоточные методы, как атомно-абсорбционная спектрометрия, позволяющая точно определить концентрацию металлов, и рентгенофазовый анализ, который помогает выявить фазовый состав и минералогическую структуру компонентов растворов.

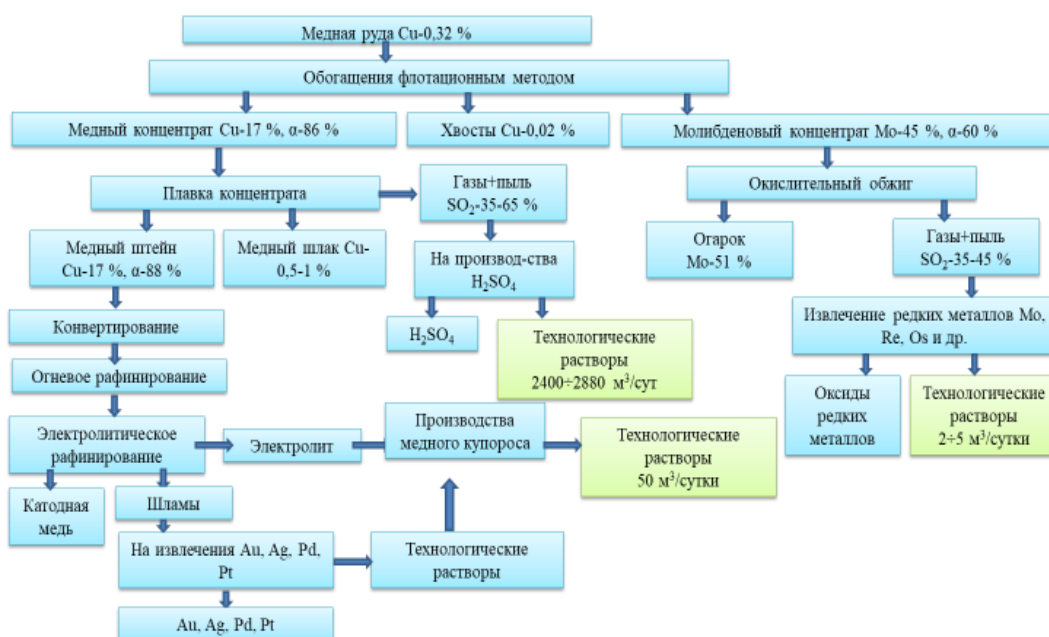


Рисунок 1 – Принципиальная схема образования технологических растворов при производстве меди

Для оценки эффективности различных методов извлечения драгоценных металлов проводились эксперименты с модельными растворами и полупромышленные испытания, которые обеспечили более точную картину поведения растворов в реальных условиях производства. Экономическая эффективность предложенных методов была рассчитана с учетом всех расходов, включая затраты на реагенты, оборудование и энергоресурсы, что позволило объективно оценить целесообразность внедрения технологии на практике.

Анализ составов растворов медного производства показал наличие в них значительных количеств драгоценных металлов, таких как золото (до 0,01 г/л), серебро (до 0,05 г/л), а также платина и палладий (до 0,002 г/л), что свидетельствует о потенциальной ценности таких растворов для переработки. В дополнение к этим металлам, растворы также содержат медь, никель и другие металлы, что создает определенные сложности при их переработке, так как для эффективного извлечения драгоценных металлов необходимо учитывать присутствие и этих элементов. Для извлечения драгоценных металлов были рассмотрены несколько методов, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества.

Сорбционные методы. Эти методы предполагают использование активированных углей и специализированных сорбентов для селективного извлечения золота и серебра из растворов. Сорбция является эффективным методом благодаря высокой адсорбционной способности угля и других сорбентов.

Электрохимические методы включают осаждение драгоценных металлов на катодах с помощью электрического тока, что позволяет извлечь металлы с высокой степенью чистоты.

Цементация – в этом методе используется цинк для осаждения золота и серебра из растворов, что является достаточно простым и дешевым процессом, однако он требует точной настройки условий для предотвращения осаждения других металлов.

Озонирование – этот процесс включает окисление примесей с целью повышения эффективности последующего осаждения металлов. Озон помогает удалять органические и некоторые неорганические примеси, что позволяет улучшить качество растворов и повысить селективность извлечения металлов.

Наибольшую эффективность продемонстрировали сорбционные и электрохимические методы. Сорбция активированными углями и электрохимическое осаждение обеспечили наибольшую степень извлечения золота и серебра, достигая показателей в 95–98 %. Это под-

черкивает необходимость дальнейшего развития этих технологий, а также их сочетания для получения оптимального результата.

Оптимизация технологии извлечения драгоценных металлов может быть достигнута с помощью комбинированных методов, включающих предварительное озонирование растворов для удаления органических примесей, а затем последующую сорбцию для селективного извлечения драгоценных металлов. Этот подход позволяет значительно улучшить селективность извлечения и сократить затраты на реагенты, что ведет к экономии ресурсов.

Расчеты показали, что комбинированный метод позволяет сократить расход реагентов на 20–30 %, при этом эффективность извлечения драгоценных металлов остаётся высокой.

Срок окупаемости внедрения новой технологии составляет всего 2–3 года, что подтверждает ее экономическую эффективность. Изученные технологические растворы медного производства представляют собой ценнейший источник драгоценных металлов, что обосновывает целесообразность их переработки.

Таким образом, предложенные методы переработки технологических растворов медного производства с извлечением драгоценных металлов представляют собой эффективное и перспективное решение для повышения эффективности металлургических процессов и улучшения экологической ситуации.

Рекомендации по дальнейшим исследованиям и внедрению технологии будут способствовать дальнейшему развитию этой области и реализации потенциала металлургической отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холикулов Д.Б. Разработка технологии переработки технологических растворов медного производства. Монография. – Алмалык: ТГТУ, 2024. – 112 с.

УДК 661.847.22

Ш.Р. Рахимкулов, асп.
(ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан);

М.А. Самадий, проф., канд. техн. наук
(КИЭИ, г. Карши, Узбекистан)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА ЦИНКА

Оксид цинка (ZnO) – неорганическое соединение, состоящее из цинка и кислорода. ZnO обычно встречается в виде белого кристалли-

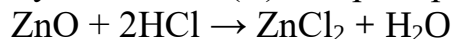
ческого порошка и является одним из наиболее изученных материалов благодаря своим уникальным свойствам. Его важные свойства, такие как полупроводниковое поведение и наноструктурный потенциал, делают его широко используемым в различных областях, таких как физика, химия и материаловедение.

Кристаллическая структура ZnO обычно имеет гексагональную (вюрцитную) кристаллическую структуру, но при определенных условиях может также принимать кубическую структуру. Эти структуры влияют на электрические и оптические свойства ZnO. Благодаря высокой температуре плавления (1975 °C) и высокой термической стабильности ZnO широко используется в высокотемпературных процессах [1].

Оксид цинка является полупроводником с широкой запрещенной зоной. Его энергия запрещенной зоны составляет около 3,37 эВ, что делает его многофункциональным материалом. Это свойство позволяет использовать ZnO в приложениях, поглощающих ультрафиолет (УФ), оптоэлектронных устройствах и фотоэлектрических системах.

Оптические свойства ZnO используются в различных оптических системах благодаря своей высокой эффективности поглощения УФ-излучения и прозрачности. Его оптические свойства позволяют применять его в солнцезащитных кремах и лосьонах для защиты от УФ-излучения. ZnO также обладает фотолюминесцентными свойствами, то есть он излучает яркий свет под воздействием УФ-излучения [2]. Поверхностная структура и размер частиц оксида цинка могут образовывать наномасштабные структуры, которые позволяют использовать его в качестве фотокатализатора. Наночастицы ZnO имеют большую площадь поверхности, что увеличивает активность реакции. Кроме того, большая площадь поверхности ZnO облегчает его применение в промышленности и биомедицине из-за его сильной адсорбционной способности.

Химическая стабильность ZnO может реагировать в различных средах, особенно под воздействием кислот и оснований. При реакции с кислотами ZnO образует соли Zn (II), например [3],



В ходе реакции образуется $\text{ZnCl}_2 \cdot \text{ZnO}$, который относительно стабилен в основных средах, что делает его пригодным для различных промышленных процессов.

ZnO фотоактивен под действием УФ-излучения и действует как фотокатализатор. Это свойство позволяет использовать ZnO в техно-

логиях очистки окружающей среды, таких как окисление органических загрязнителей в воде и снижение загрязнения воздуха.

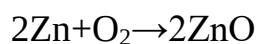
Наночастицы ZnO обладают антибактериальным действием и могут предотвращать рост и размножение микроорганизмов. Это свойство делает ZnO полезным в биомедицинской и косметической областях [4].

Благодаря своим физическим и химическим свойствам ZnO широко используется в различных областях:

- оптоэлектроника и фотовольтаика: полупроводниковые свойства ZnO позволяют широко и эффективно использовать его в солнечных батареях и светодиодном освещении [5].
- промышленность и строительство: ZnO используется в производстве красок, защитных покрытий и керамики.
- биомедицина и косметика: антибактериальный эффект ZnO и его свойства поглощения УФ-излучения используются в кремах, лосьонах и лаках для ногтей [6].

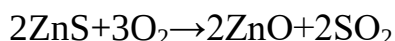
Существует несколько способов получения оксида цинка (ZnO). Эти методы используются в промышленности и в лабораториях, некоторые, наиболее распространенные методы:

Прямое окисление цинка: металлический цинк реагирует с кислородом при высокой температуре с образованием чистого оксида цинка.



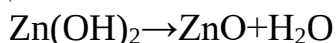
Этот процесс достигается путем нагревания металлического цинка при высокой температуре с кислородом.

Разложение карбоната цинка: карбонат цинка (ZnCO_3) разлагается при высокой температуре с образованием оксида цинка и углекислого газа:

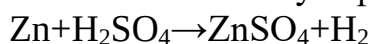


Этот метод используется для получения небольших количеств ZnO в лабораториях.

Химическое осаждение и нагрев: гидроксид цинка (Zn(OH)_2) образуется в результате реакции солей цинка (например, $\text{Zn(NO}_3)_2$ или ZnSO_4) под действием гидроксида, а затем этот гидроксид нагревается и превращается в оксид цинка:



Оксид цинка получают сжиганием сульфида цинка:



Оксид цинка (ZnO) является ценным материалом в науке и промышленности благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Его широкозонное полупроводниковое поведение, фото-

химическая активность и антибактериальный эффект позволяют эффективно использовать ZnO в оптоэлектронике, биомедицине и экологических технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Özgür, Ü., Alivov, YI, Liu, C., Teke, A., Reshchikov, MA, Dogan, S., Avrutin, V., Cho, SJ, and Morkoç, H.. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 2005. – 041301.
2. Klingshirn, C. (2007). ZnO: From Fundamentals to Applications. *Physica Status Solidi (b)*, 244 (9), – P. 3027–3073.
3. See DC (2001). Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering: B*, 80(1–3). – P. 383–387.
4. Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Daskalakis, N., Jeuken, L., Povey, M., & O'Neill, AJ, & York, DW (2010). Mechanistic investigation of the antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions against *E. coli*. *Journal of Nanoparticle Research*, 12 (5). – P. 1625-1636.
5. Janotti, A. and Van de Wall, CG (2009). Basics of zinc oxide as a semiconductor. *Progress Reports in Physics*, 72(12), 126501.
6. Wang, ZL (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(25). – P. 829–858.

УДК 669.053.4

Д.Б. Холикулов, д-р техн. наук, проф., зам. директора
по научной работе и инновациям;
И.И. Шайманов, докторант кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
(Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического
университета им. Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Диоксид кремния (SiO_2) на сегодняшний день является одним из важнейших материалов, широко используемых в различных отраслях промышленности. Его аморфная разновидность обладает высокими характеристиками и играет значительную роль в производстве электроники, оптики, резиновой техники, химической промышленности и строительных материалов. Разработка технологии получения аморфного диоксида кремния из металлургических отходов, содержащих кремний, в настоящее время считается актуальной задачей, так как

она одновременно связана с защитой окружающей среды, переработкой отходов и производством высококачественной продукции.

На сегодняшний день основную часть отходов, образующихся на промышленных предприятиях, составляют соединения кремния. Например, в отходах, образующихся в процессе металлургического производства (шлаки, шламы, хвосты, пыли и др.), содержится значительное количество диоксида кремния. Не переработка этих отходов приводит не только к потере экономических ресурсов, но и к экологическим проблемам. Поэтому переработка отходов, содержащих диоксид кремния, и разработка технологий получения из них ценного продукта – аморфного диоксида кремния – является одной из актуальных тем.

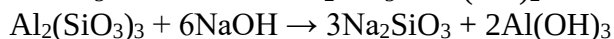
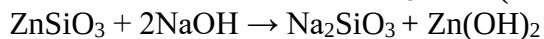
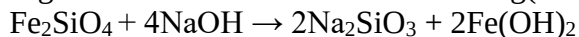
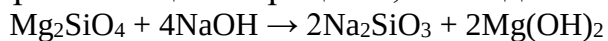
В последние годы исследования по извлечению соединений кремния из металлургических отходов получили широкое распространение. Из-за экологической и экономической значимости переработки металлургических отходов данная технология остается в центре внимания исследователей. Анализ литературы показывает, что высокая концентрация диоксида кремния в отходах образуется в результате промышленных процессов, и для их переработки применяются различные металлургические методы (обжиг, плавка, селективное плавление, обогащение, нейтрализация и др.).

В некоторых источниках предложены методы извлечения диоксида кремния путем сублимации кремния в виде соединений [1]. Вместе с тем, многие исследователи уделяют внимание переработке отходов, содержащих кремний, с использованием гидротермальных методов. В частности, гидротермальные процессы позволяют выделять аморфный диоксид кремния в высокой степени чистоты [2–3]. Кроме того, технологии плазменной переработки обеспечивают высокую степень очистки диоксида кремния [4].

В настоящее время переработка металлургических отходов, содержащих кремний, на территории Узбекистана связана с рядом сложностей. Основная причина заключается в том, что помимо диоксида кремния в составе металлургических отходов присутствуют железо, алюминий, оксиды кальция и другие примеси, которые в процессе металлургического производства образуют соединения с диоксидом кремния. Эти отходы обладают высокой химической стойкостью, что затрудняет их растворение или переработку в реакционной среде.

Для переработки металлургических отходов, содержащих кремний, требуется использование высоких температур, давления или специальных реагентов, что увеличивает энергетические и экономические затраты. Кроме того, в процессе переработки существует вероятность образования вредных газов и твердых отходов, что требует принятия мер по обеспечению экологической безопасности.

Предлагаемая технология основана на переработке кремния, содержащегося в металлургических отходах, с использованием гидроксида натрия (NaOH). В этом процессе сложные соединения кремния с другими металлами разрушаются, и кремний переводится в растворимую в воде форму – натриевый силикат (Na₂SiO₃). Химические реакции, протекающие в процессе, выглядят следующим образом:



В дальнейшем полученный водный раствор натриевого силиката перерабатывается с использованием специальных процессов. В результате переработки из натриевого силиката выделяется аморфный диоксид кремния (SiO₂). Данная технология позволяет преобразовать диоксид кремния из отходов в полезный продукт, повышая экономическую эффективность и снижая вредное воздействие на окружающую среду.

Анализ литературы показывает, что технология переработки металлургических отходов, содержащих диоксид кремния, с использованием гидроксида натрия имеет определённые преимущества перед сублимационной технологией. Например, процесс обработки гидроксидом натрия может осуществляться при более низких температурах, что значительно снижает энергозатраты [5]. Кроме того, в процессе переработки с использованием гидроксида натрия образуется меньше загрязняющих веществ, а воздействие на окружающую среду минимизируется [6]. Несмотря на преимущества сублимационной технологии, её применение ограничивается высоким требованием к температурным условиям и технологической сложностью [7].

В заключение следует отметить, что технология переработки металлургических отходов, содержащих диоксид кремния, с использованием гидроксида натрия (NaOH) обладает высокой эффективностью, экологической безопасностью и экономическими преимуществами. Данная технология позволяет в процессе переработки отходов выделять водорастворимый натриевый силикат, из которого впоследствии можно получить аморфный диоксид кремния. Метод обработки гидроксидом натрия отличается более низкими энергозатратами и повышенной экологической безопасностью технологического процесса по сравнению с сублимационной технологией. Сублимационный метод требует высоких температур, что увеличивает энергозатраты, а также сопровождается значительными выбросами в атмосферу.

Однако у технологии переработки с использованием гидроксида натрия также есть некоторые недостатки. Процесс создает коррозион-

ную среду, что может привести к износу металлического оборудования, увеличивая затраты на внедрение и эксплуатацию технологии. Кроме того, необходимость утилизации больших объемов используемого гидроксида натрия и побочных продуктов усложняет процесс.

Сублимационная технология, хотя и эффективна для получения высокочистого кремния, не получила широкого применения из-за высокой энергоемкости и экологических проблем. Поэтому метод переработки с использованием гидроксида натрия рассматривается как технологическая альтернатива, объединяющая экологическую безопасность и экономическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uhlmann, D. R., Kreidl, N. J. Sublimation of silicon compounds in silica extraction processes // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1980. – Т. 42, № 2. – С. 131–146.
2. Byrappa, K., Yoshimura, M. *Handbook of Hydrothermal Technology: A Technology for Crystal Growth and Materials Processing*. – New York: William Andrew Publishing, 2001. – 772 с.
3. Iler, R. K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*. – New York: Wiley-Interscience, 1979. – 896 с.
4. Andrievski, R. A. Plasma-chemical synthesis and processing of high-purity materials // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Т. 356, № 1–2. – С. 1–18.
5. Hassan, M., et al. Chemical processes for silicon extraction from metallurgical waste // *Journal of Environmental Chemistry and Engineering*. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 102–112.
6. Lee, S., et al. Environmental impact and efficiency of silicon extraction methods // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2020. – Т. 3, № 1. – С. 89–95.
7. Gupta, P., et al. Sublimation and its applications in metal extraction // *Minerals Engineering*. – 2014. – Т. 62. – С. 13–21.

Ж.М. Шодикулов, PhD, доц.;
Ф.Э. Умиров, проф., д-р техн. наук;
Д.З. Бобокулова, магистр
(НГГТУ г. Навои, Узбекистан)

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВ МИНЕРАЛА СЕРПЕНТИНИТА АРВАТЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Магниевые соединения играют ключевую роль в различных отраслях народного хозяйства. К наиболее значимым из них относятся оксид магния, хлорид магния, карбонат магния, сульфат магния и другие соли. Эти вещества находят широкое применение: их используют в производстве строительных вяжущих материалов, для очистки нефтепродуктов, а также в качестве наполнителей при изготовлении резины. В пищевой промышленности этот компонент известен под кодом E530 и классифицируется как безопасное вещество для организма. Однако основная доля потребления оксида магния приходится на фармацевтическую отрасль. Это соединение добавляют в лекарственные препараты и применяют как в самостоятельной, так и в комплексной терапии [1–5].

В патентах [6–7] серпентинит обрабатывают 10–15%-ным раствором соляной кислоты при температуре 80 °С, получая суспензию, которая фильтруется для выделения раствора хлорида магния и диоксида кремния. Затем раствор очищают от примесей нейтрализацией, выделяя железоникелевый концентрат. Очищенный раствор хлорида магния используют для синтеза карналлита, который впоследствии обезвоживают и подвергают электролизу. В результате получают магний, хлор и переработанный электролит, возвращаемый в процесс.

Описанные выше методы переработки серпентинита имеют ряд недостатков. В частности, при использовании серной или азотной кислоты выход конечного продукта оказывается относительно низким. При переработке серпентинита сульфатом аммония требуется высокая температура, что подразумевает необходимость использования специализированных печей. Кроме того, обработка серпентинита соляной кислотой сопровождается высокой коррозионной агрессивностью, что негативно влияет на стальное оборудование, а также создает риск выбросов газообразного хлора. С учётом указанных ограничений нами проведены исследования возможности получения оксида магния из местных серпентинитов. Эксперименты включали обработку серпентинита серной кислотой, а также смесью серной и азотной кислот.

Для проведения исследований использовался серпентинит Арветенского месторождения. Перед началом экспериментов сырьё было измельчено до размера частиц 0,25 мм. Химический состав исходного материала представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав серпентинита Арветенского месторождения

Наименования сырья	Содержание компонентов, вес. %							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	NiO	K ₂ O	H ₂ O
Серпентинит	42,9	4,76	2,20	7,02	39,7	1,38	0,3	4,8

В таблице 2 представлены результаты масс-спектрометрического анализа (ICP-MS) серпентинита. Анализ показал, что данный материал содержит широкий спектр элементов, которые могут быть востребованы в различных отраслях народного хозяйства.

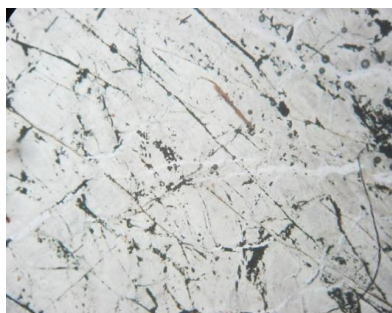
Таблица 2 – Результаты масс-спектрометрического анализа серпентинита

Наименование и содержание элементов, в г/т									
Li 0,838	Be 0,01	B 25,3	Na 202	Sc 9,44	V 0,01	P 787	K 388	Co 581	Cr 6012
Mn 402	W 1,41	Co 7,17	Ni 13742	Cu 5,88	Zn 34,9	Mo 7,10	Ag 0,05	Ba 1,14	Ti 126

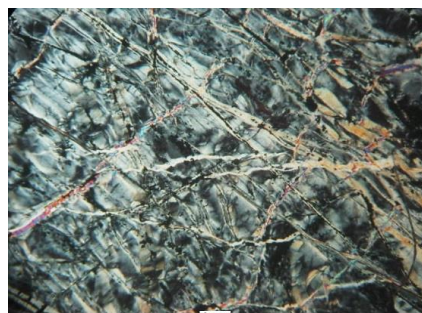
Для уточнения информации о минералогическом составе и структуре серпентинита Арветенского месторождения были проведены исследования с использованием электронного микроскопа. Микрофотографии (рис. 1) показали, что серпентинит имеет брекчированную структуру и умеренную оплавку, обусловленную процессами термического метаморфизма.

Состав серпентинита Арветенского месторождения представлен следующим образом: антигорит $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)$ составляет 75%, хризотил $(Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4)$ – 3–5%, тальк $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ – 10–15%, магнезит $(MgCO_3)$ – 0,5–1%, а также рудные минералы, включая магнетит $(FeO \cdot Fe_2O_3)$ с микровключениями хромита $(FeCr_2O_4)$ и сульфидов никеля (NiS) в объёме 3–5%. Структура породы характеризуется катакластической аллотриоморфно-неравномерно-микрозернистой структурой, а текстура представлена катакластической микробрекчиевой с сетью плёночных прожилков хризотила и талька. Вкрапления рудных минералов, кварца, карбоната и хлорита хорошо различимы (рис. 1 микрофото 1, 3, 5).

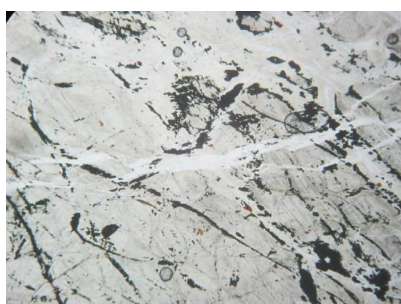
Антигорит составляет основную массу породы, формируя микрообрывки пластинчатых зерен длиной до 0,25 мм, которые видны как белые участки на микрофото 2, 4, 6.



1. С одним николем



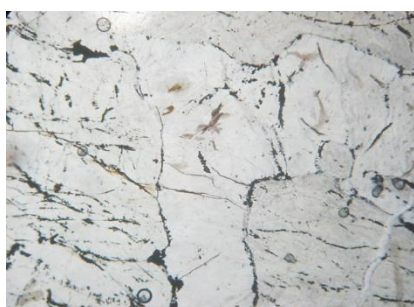
2. Микрофото 1 при скрещенных николях



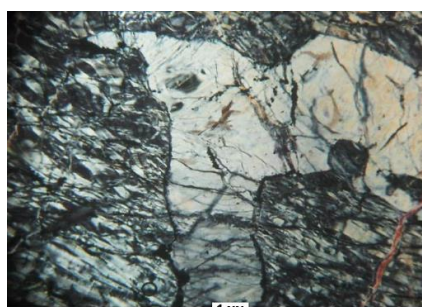
3. С одним николем



4. Микрофото 3 при скрещенных николях



5. С одним николем



6. микрофото 5 при скрещенных николях

Рисунок 1 - Микрофотографии серпентенита Арветенского месторождения

Хризотил представлен плёночными микропрожилками, пересекающими антигоритовую основу в различных направлениях (микрофото 1–4), а также мелкими скоплениями волокнистых микрокристаллов около прожилков талька. Тальк образует тонкие, разнонаправленные прожилки, которые отличаются от хризотила и антигорита при скрещенных николях (микрофото 3 и 4). Рудные минералы, такие как магнетит, распределены преимущественно в микрозернистых блоках антигорита в виде скоплений микропылеватых зёрен или микропрожилков (чёрные участки на микрофото 1, 3, 5). В отличие от серпентинитов других месторождений, где рудные минералы представлены более крупными зёрнами магнетита, ильменита и хромита, данный серпентинит отличается наличием микровключений кварца, хлорита и карбоната. Кварц образуется как результат выделения кремниевой

кислоты, которая высвобождается при замещении серпентина тальком, хлоритом или карбонатами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осадченко И.М., Лябин М.П., Романовская А.Д. Оксид магния: свойства, методы получения и применения / Природные системы и ресурсы. -2018. -№ 3.Т.8. – С. 5–14.
2. Аверина Г.Ф., Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я. Исследование взаимосвязи объемных деформаций, состава и структурных магнезиальных вяжущих / Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура» 2017. Т.17, №3. С. 40–47.
3. Хамидов Р.А. Панченкова Л.А. Ресурсы магнезиального огнеупорного сырья Узбекистана / Геология ва минерал ресурслар. –2000. – № 3. – С. 25–27.
4. Габдуллин А.Н. Разработка способа азотнокислотной переработки серпентенита Баженовского месторождения: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – 22 с.
5. Макаров В.Н. Минералогические критерии комплексной переработки рудовмещающих гипербазитов. Апатиты, 1989. – 94 с.
6. Патент 2356836 Российская Федерация, С 01. Способ комплексной переработки серпентенита/ Р.Г. Фрейдлинка, Н.Б. Овчинникова, А.И. Гулякин, Л.Н. Сабуров, Ю.А. Ряпосов, – Б.И.2009, № 15.
7. Патент 2209780 Россия. МПК6 СО2 F 5/02. Способ получения чистого оксида магния /Ю.Ю. Александров, Ю.В. Олейников, Г.П. Парамонов, – Б.И.2006, № 11.

УДК 546.1

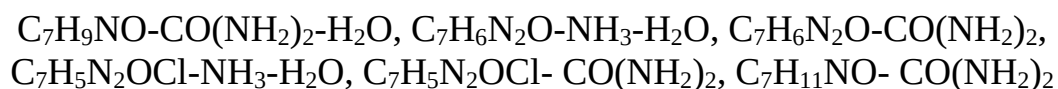
И. Абидов, доц., канд. техн. наук;
Ф. Ф. Хошимов, доц., канд. техн. наук
(НамИТИ, г. Наманган, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ МОЧЕВИНЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Производство удобрений, содержащих ФАВ, не сопряжено со значительными удельными капиталовложениями на реконструкцию существующих технологических схем, однако при этом необходимо решить ряд технологических производств, связанных с организацией узлов дозировки ФАВ, смешения ФАВ с большим потоком удобрения,

аналитическим контролем качества готового продукта. В связи с этим, рассмотрены вопросы и проведены исследования по разработке способов введения ФАВ в состав удобрений и получения карбамида, модифицированного ФАВ. Одним из способов решения проблемы химизации сельского хозяйства является создание комплексных удобрений, содержащих физиологически активные вещества (ФАВ), стимуляторов роста и развития растений. Как правило, введение физиологически активных веществ, несмотря на их относительно высокую стоимость, дает положительный эффект при их низких (от 0,03 до 0,05 мас.%) концентрациях в комплексном удобрении. На основе проведенных исследований показано получение ряда стабильных композиции, изучение которых показало их эффективность для сельского хозяйства в качестве стимуляторов роста растений [1, 2]. Твердофазным способом получены полимерные комплексы, содержащие физиологически активные вещества [3, 4].

При решении ряда технологических задач использованы данные по растворимости и плавкости в следующих изученных системах:



Для изучения растворимости фаз в водно-солевых системах использовался визуально-политермический метод анализа, разработанный А.Г. Бергманом. Сущность визуально-политермического метода заключается в определении температуры кристаллизации визуальным наблюдением появления первых кристаллов, которые выделяются при медленном охлаждении и энергичном перемешивании раствора, а также температуры исчезновения последних кристаллов при нагревании, после чего строится диаграмма состав–температура кристаллизации [5, 6].

При выполнении исследований применялись соли квалификации "ЧДА." и "ХЧ." и синтезированные лабораторным путем БИОН, 5-ХБИОН, ИВИН, ТПН. Проводились анализы по известным методикам на содержание азота по методу Кьельдаля, воды – по методу Фишера.

При разработке технологии получения мочевины, модифицированной физиологически активными веществами, последние можно вводить либо в раствор, либо в плав мочевины. Необходимым условием является полное растворение или равномерное смешение добавок, вследствие их низких концентраций в составе готового продукта.

Проведенные исследования растворимости в системах $\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{O}$ ($\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_2\text{OCl}$, $\text{C}_7\text{H}_{11}\text{NO}$)- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2-\text{H}_2\text{O}$ показали, что БИОН, 5-ХБИОН,

ТПН не растворяются в водных растворах мочевины и введение его на стадиях дистилляции и выпарки не представляется возможным.

В связи с этим, для физико-химического обоснования введения ФАВ в состав мочевины, нами была изучена плавкость в системах $C_7H_6N_2O-CO(NH_2)_2$, $C_7H_5N_2OCl-CO(NH_2)_2$, $C_7H_9NO-CO(NH_2)_2$. Образование новых соединений не наблюдается. В плаве карбамида растворяется до 4,0% $C_7H_6N_2O$ и $C_7H_5N_2OCl$ и 15,0% $C_7H_{11}NO$ от выше указанных концентраций, ФАВ растворяются при температурах более 135°C.

Это предопределяет возможность введения последних непосредственно только в плав мочевины для производства ФАВ-содержащего карбамида. Для получения мочевины, содержащего ИВИН, ТПН, БИОН, 5-ХБИОН, необходимы физико-химические данные по поведению количества добавок в растворах и плаве карбамида, влиянию их на свойства раствора или плава по накоплению биурета при производстве удобрений.

Наиболее важным критерием качества мочевины является содержание в нем биурета. Биурет является продуктом термического разложения карбамида:



Он образуется в каждом узле технологической схемы. Причем, наиболее узкими местами являются стадии выпарки и подачи плава на грануляцию, где образуется около половины всего биурета, содержащегося в готовом продукте. Допустимое содержание биурета в различных сортах карбамида, колеблется в пределах от 0,3 до 2,5 % в гранулированном карбамиде и от 0,05 до 0,8 % – в кристаллическом.

В связи с тем, при получении мочевины ФАВ вводятся в горячий плав, имеющий температуру 135–140°C, представляет интерес сведения о накоплении биурета при различных концентрациях добавок ФАВ. Для этого изучено влияние температуры и продолжительности смешения ФАВ с карбамидом на кинетику образования биурета. Для построения кривых через определенные промежутки времени проводили отбор мочевины и анализировали ее на содержание биурета спектрофотометрическим методом.

При проведении исследования одновременно визуально фиксировали время полного растворения добавки ФАВ, которое в зависимости от температуры и количества БИОН, 5-ХБИОН колебалось в пределах 0,5–5,0 мин. Продолжительность опытов составляла 60 мин. Жидкие ИВИН и ТПН растворяются мгновенно в плаве мочевины. С увеличением концентрации ФАВ в карбамиде скорость образования

биурета по сравнению с карбамидом без добавки изменяется незначительно. То же самое наблюдается при сравнительно невысоком, до 0,5%, содержании ФАВ – БИОНа и 5-ХБИОНа. Можно предположить, что это связано с изменением давления различных газовых соединений над плавом, который характеризуется кинетикой протекающих побочных физико-химических процессов в присутствии ФАВ. При дальнейшем повышении концентрации БИОНа и 5-ХБИОНа, содержание биурета в карбамиде возрастает, а скорость растворения ФАВ резко снижается.

При реализации технологических схем получения карбамида, содержащих ИВИН, ТПН, БИОН, 5-ХБИОН в качестве физиологически активной добавки, вследствие их весьма низких (0,03–0,05%) концентраций содержание биурета в готовом продукте практически не изменяется и возрастает на величину не более 0,05–0.1 абс. % и полностью соответствует требованиям ГОСТа. Таким образом, исследование кинетики накопления биурета в карбамиде показывает принципиальную возможность и позволяет найти оптимальные условия введения данных ФАВ в плаве карбамида.

Для получения мочевины, модифицированного физиологически активными соединениями – БИОН, 5-ХБИОН, ТПН, необходимо провести реконструкцию узла подачи плава карбамида на грануляцию существующей технологической схемы производства гранулированного карбамида. Введение ИВИНа в карбамид таким способом не представляет особых затруднений и не требует существенного изменения действующей технологии.

Таблица – Плотность и вязкость карбамида, содержащего физиологически активные вещества

№	Содержащего ФАВ, мас.%	Плотность, кг/м ³	Вязкость	
			кинематическая, сСт	динамическая мПа*с
1	Карбамид	1268,8	2,2500	2,831
2	1% БИОН	1270,2	2,2800	2,8961
3	3% БИОН	1272,0	2,2950	2,9198
4	5% БИОН	1273,8	2,3106	2,9432
5	1% 5-ХБИОН	1270,9	2,1694	2,7571
6	3% 5-ХБИОН	1280,9	2,2904	2,9338
7	1% ТПН	1265,5	2,0382	2,5793
8	3% ТПН	1258,4	2,1996	2,7680
9	5% ТПН	1252,0	2,2904	2,8676
10	1% ИВИН	1226,8	1,9776	2,4261
11	3% ИВИН	1238,4	2,0382	2,5241
12	5% ИВИН	1249,7	2,1088	2,6354

Анализ полученных данных свидетельствует о незначительном влиянии ФАВ на плотность, вязкость плава карбамида; в случае с БИОНОм и 5-ХБИОНОм наблюдается незначительное увеличение плотности и вязкости, тогда как в случае с ИВИНОм и ТПНОм наблюдается их незначительное понижение.

Таким образом, введение ФАВ в плавы карбамида не ухудшает его реологические характеристики, и, следовательно, он может легко транспортироваться существующими способами на стадию гранулирования. Полученный карбамид полностью соответствует требованиям ГОСТа по содержанию биурета и другим физико-химическим показателям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abidov I., Hoshimov F. Study of interaction in systems consisting of N-oxide-2,6-dimethylpyridine and ammonium dihydro-, hydro-orthophosphates. // Scientific and technical journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. 2020, №3. – P. 45–58.

2. Абидов И., Хошимов Ф. Ф. Технология получения аммофоса, модифицированного физиологически активными веществами. // Universum: химия и биология: научный журнал. 2020. № 11(77). – С.85–93.

3. Абидов И., Хошимов Ф. Технология модифицированного аммофоса. // International scientific-methodical journal UzAcademia 2020. Volume 1. Issue 8. – P. 33–47.

4. Абидов И., Хошимов Ф., Охундадаев А., Солиев М. Технология получения минеральных удобрений с БАВ. Chisinau. Lambert Academic Publishing. 2020.

5. Abidov I., Hoshimov F. Obtaining a complex fertilizer of carbamide with physiologically active substances. // Scientific and technical journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. 2020. № 4. – P. 89–97.

6. Abidov I., Hoshimov F. Obtaining a complex fertilizer of ammonium phosphate containing physiologically active substances. // Scientific and technical journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. 2020, № 4. – P. 97–108.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО УДОБРЕНИЯ И ПРЕЦИПИТАТА В ОДНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

В Узбекистане 60 % орошаемых земель подвержены засолению, вследствие чего их производительность в 2–2,5 раза ниже, чем на не-солёных почвах [1]. В зависимости от типа и степени засоленности вегетационный период растения продлевается на 10–30 дней, урожай снижается на 20–50 % и более, ухудшаются качество и технологические показатели. Исследования влияния дефицита кальция на обмен веществ и продуктивность хлопчатника при различной степени карбонатного, хлоридного, сульфатного и сульфатно-хлоридного засоления показали, что обеспеченность хлопчатника кальцием в значительной мере снижает токсическое действие ионов засоления на его рост, развитие и урожайность [2].

Многолетние испытания нитрата кальция показали его преимущество по сравнению с другими кальцийсодержащими препаратами. Наиболее эффективным способом повышения солеустойчивости хлопчатника, зерновых, овоще-бахчевых культур является внесение в почву нитрата кальция. По данным министерства сельского хозяйства потребность республики в нитрате кальция составляет 250–300 тыс. т в год. Несмотря на большую потребность в нитрате кальция его производство в Узбекистане отсутствует. Это объясняется, прежде всего, тем, что нитрат кальция обладает неудовлетворительными физико-химическими свойствами – низкая прочность гранул, высокая гигроскопичность, слеживаемость, отсутствие азотнокислотного способа переработки фосфатного сырья и получения не слеживающейся гранулированной аммиачной селитры. Разработка технологии гранулированного нитрата кальция на основе местных фосфоритов является актуальной проблемой для страны, несмотря на наличие больших объемов отходов обогащения фосфоритов Центральных Кызылкумов в виде минерализованной массы (ММ) на Кызылкумском обогатительном комплексе. Вовлечение ММ в промышленное производство азотнокислотным разложением позволит дополнительно получать фосфорсодержащие удобрения, которых не хватает в республике. Причина, сдерживающая широкое внедрение азотнокислотного способа переработки фосфоритов, – это сложность разделения продуктов разложения на азотную и фосфатную части.

Для изучения данной проблемы использовали ММ состава (масс. %): P_2O_5 – 12,86; CaO – 36,75; MgO – 0,83; Al_2O_3 1,17; Fe_2O_3 – 1,37; F – 1,85; н.о. – 11,89. Разложение ММ проводили

40 %-ной азотной кислотой при ее норме 100–150 % от стехиометрии. Полученные результаты показали, что при этом содержание P_2O_5 в азотнокислотной пульпе составляет 5,09–7,73 %, CaO 9,20–13,10 %, $Ca(NO_3)_2$ 26,95–38,36 %, а образующаяся пульпа практически не расслаивается и не фильтруется.

Исследования влияния степени нейтрализации пульпы газообразным аммиаком на процесс фильтрации показали, что при pH 6,5–7 скорость фильтрации по пульпе составляет 514 кг/м²·ч, по фильтрату 348 кг/м²·ч и по сухому остатку 152 кг/м²·ч при использовании в качестве фильтра фильтровальной бумаги «синяя лента». Использование в качестве фильтра промышленной фильтровальной ткани (№ 1 и № 2) скорости фильтрации по пульпе, фильтрату и сухому остатку резко повышаются и достигают 1200–1500 кг/м²·ч.

Таблица – Влияние типа фильтра на скорость фильтрации азотнокислотной пульпы разложения ММ, аммонизированной до pH 6,5-7

№	Фильтр	Скорость фильтрации, кг/м ² ·ч		
		по пульпе	по фильтрату	по осадку
1	Синяя лента	514	348	152
2	Ткань № 1	1198	879	384
3	Ткань № 2	1501	1016	444

Химический анализ жидкой фазы показал наличие 4,08% P_2O_5 в кислом фильтрате и практическое отсутствие его при pH 6,5-7. Содержание CaO снижается с 12,52 % до 9,12%, 8,65 % и 7,26 % при pH = 3–5,2 и 7,2 соответственно.

Химический анализ твёрдой фазы после промывки и сушки показал, что с повышением pH пульпы содержание P_2O_5 в твёрдой фазе составляет при pH = 3 19,95 %, при pH = 5,2 – 20,23 % и при pH = 7,2 21,29 %. При этих параметрах содержание CaO составляет 32,12 %, 33,65 % и 34,26 % соответственно. Жидкая фаза представляет собой азотно-кальциевое удобрение, которое является эффективным средством для засоленных почв, а твердая фаза – удобрительный преципитат является ценным медленно действующим фосфорным удобрением для внесения под зябь. В результате проведённых исследований найдено техническое решение, защищенное патентом РУз, позволяющее разделить азотнокислотную пульпу, полученную на основе ММ - техногенных отходов обогащения фосфоритов Центральных Кызылкумов, в одном технологическом цикле и получить два вида ценных удобрений.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Н. Набиев, Р.Г. Осичкина, С. Тухтаев. Сульфат калия с микроэлементами. Ташкент: ФАН УзССР, 1988. – 164 с.
2. Р.А. Азимов. Физиологическая роль кальция в солеустойчивости хлопчатника. Ташкент: ФАН, 1973. – 204 с.

4.2 Подсекция «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

УДК 621.926

П.Е. Вайтехович, доц., д-р техн. наук;
П.С. Гребенчук, ст. преп., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Исследованиями процессов измельчения на кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств занимаются уже более 25 лет. Одним из перспективных и интересных направлений этих исследований можно считать изучение ударного измельчения и агрегатов для его осуществления [1].

В качестве объектов исследований из ряда указанных агрегатов были выбраны дисмембратор и ударно-центробежная мельница. Выбор дисмембратора обусловлен тем, что это универсальный агрегат, который может использоваться в качестве смесителя, дробилки, мельницы для грубого, тонкого, сверхтонкого и даже коллоидного помола. В противоположность ему, ударно-центробежная мельница – узконаправленный агрегат, но отличающийся простотой конструкции и широкими возможностями практической реализации.

На начальном этапе дисмембратор, как энергонапряженный измельчитель, использовался для механической активации вяжущих материалов, в частности, цемента. Образцы бетона, сформированные с использованием активированного цемента, показали, что их прочность увеличивается в три раза. Одновременно применение активированного в дисмембраторе цемента взамен обычного заводского при сохранении требуемой прочности позволяет уменьшить его расход на 15%, что для крупнотоннажных производств довольно существенно [2].

Что касается теоретической части работы, то были составлены дифференциальные уравнения движения твердой фазы вместе с воздухом в загрузочном патрубке и предпальцевой зоне. В результате компьютерного решения этих уравнений были определены координаты сектора, который занимают частицы, входящие в межпальцевое пространство (рис. 1).

По этим данным можно рассчитать коэффициент загрузки дисмембратора.

$$k_3 = \frac{360 - \theta}{360}. \quad (1)$$

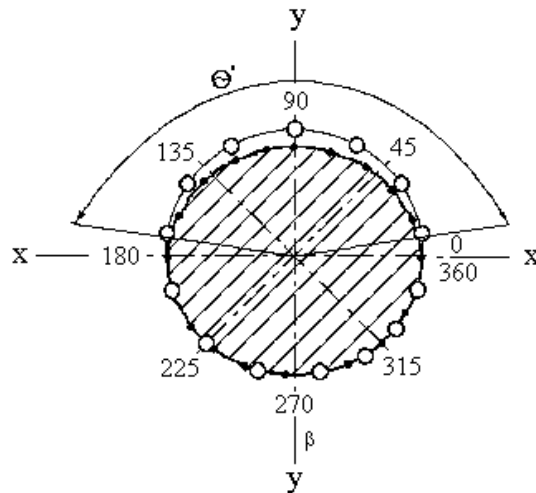


Рисунок 1 – Координаты входа частиц в межпальцевое пространство

Этот коэффициент вносит поправку в формулу для его производительности, определяемой по пропускной способности первого внутреннего ряда пальцев. В зависимости от частоты вращения ротора он изменяется в пределах $k_3 = 0,19 \div 1,0$ [3].

По результатам спроектирована и изготовлена помольная установка на основе дисмембратора с выносным полочным классификатором. Одновременно для снижения металлоемкости предложена конструкция дисмембратора со встроенной классифицирующей камерой.

Работы по аналитическим и экспериментальным исследованиям ударно-центробежных мельниц проводились совместно с ОАО «НПО «Центр». Составлены дифференциальные уравнения относительного движения твердых частиц в межлопастевом пространстве ротора. В полярной системе координат они имеют вид [4].

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\ddot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r; \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} + 2\omega\dot{r}. \end{cases} \quad (2)$$

Решение этих уравнений позволило определить траекторию движения частиц по поверхности ротора (рис. 2).

По изменению траектории видно, что вначале частицы движутся по диску ротора, затем с определенной скоростью и под определен-

ным углом ударяются о лопасти. Дальнейшее движение, вплоть до срыва с ротора, происходит вдоль лопасти.

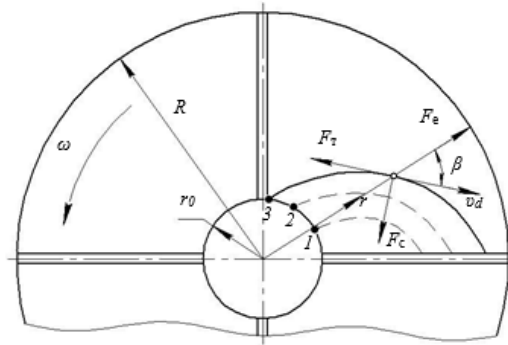


Рисунок 2 – Расчетная схема и траектория движения частиц по поверхности ротора

Полученная картина привела нас к осознанию того, что приведенные выше данные можно использовать для определения и прогнозирования абразивного износа лопастей [5]. А надо отметить, что он в ударно-центробежных мельницах достаточно высок. Поэтому его прогнозирование на стадии конструирования и изготовления новых помольных агрегатов представляется крайне актуальным.

По траектории движения сразу можно отметить, что в ударно-центробежной мельнице происходит сразу два вида абразивного износа: ударно-абразивный при ударе частиц о лопасть и микрорезание при их скольжении по поверхности ротора.

Для расчета ударно-абразивного износа нами использована модель Бекмана-Гоцмана. Согласно ей, величина относительного объемного износа W_1 (м³/кг) рассчитывается по формуле.

$$W_1 = \frac{3}{4\pi\rho_c e_s^*} (\tau_{s1} I_1 + \tau_{s2} I_2), \quad (3)$$

где τ_{s1} и τ_{s2} – прочность адгезионных связей, Па; I_1 и I_2 – изменение поверхности при срезе металла, м²/м³.

При определении указанных параметров учитывалась скорость соударения, угол атаки, твердость поверхности. Индекс 1 относится к стадии пластической деформации с оттеснением металла, а 2 – еще дополнительно и с его плавлением.

При скольжении частиц по поверхности лопасти реализуется процесс микрорезания. Здесь относительный износ W_2 (м³/кг) можно определить как

$$W_2 = \frac{S_m}{4\mu r_0^2 \rho_c} l, \quad (4)$$

где S_m – площадь сегмента срезаемого материала, m^2 ; l – длина поверхности среза, m ; r_0 – радиус зерна абразива, m ; ρ_c – плотность среды (абразива), kg/m^3 ; μ – коэффициент разрыхления.

Экспериментальными исследованиями подтверждено, что суммарный износ $W_1 + W_2$ по величине близок к расчетному.

Следует отметить, что проведенные исследования по ударному измельчению можно считать только начальным этапом в изучении этого процесса. В дальнейшем необходимо более глубоко вникнуть в теорию ударного разрушения, детально изучить процесс абразивного износа и аэродинамику газового потока в помольных агрегатах ударного действия. В процессе выполнения этих исследований должны появиться новые технические решения, обеспечивающие высокую степень измельчения при одновременном снижении энергозатрат. Важной остается и задача снижения абразивного износа элементов конструкции ударных измельчителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайтехович, П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович – Минск: БГТУ.–2008.– 220 с.

2. Мурог, В.Ю. Моделирование процессов диспергирования и механической активации в аппаратах дезинтеграторного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / В.Ю. Мурог; БГТУ. – Мн., 2005. – 20 с.

3. Вайтехович, П.Е. Процессы эффективного измельчения в агрегатах с инерционным воздействием на разрушаемый материал: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / П.Е. Вайтехович; БГТУ. – Мн., 2011. – 37 с.

4. Вайтехович, П. Е. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках / П. Е. Вайтехович, П. С. Гребенчук, А. В. Таболич, А.А. Верховодко // Горная механика и машиностроение. – 2017, № 2, С. 54 – 63.

5. Вайтехович, П. Е. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. - № 3, С. 12-16.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЙ РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ГИДРОМАШИН

Эксплуатационная надежность центробежных гидромашин в значительной степени зависит от работы уплотнительных узлов, герметизирующих вращающийся ротор. Одной из важнейших проблем современного машиностроения является решение задачи создания надежных и герметичных уплотнений роторов центробежных компрессоров. Это обусловлено, с одной стороны, высокими давлениями уплотняемой среды и окружными скоростями в уплотняющем контакте, с другой стороны – очень жесткими требованиями к герметичности и надежности, которые повышаются вместе с ростом параметров [1].

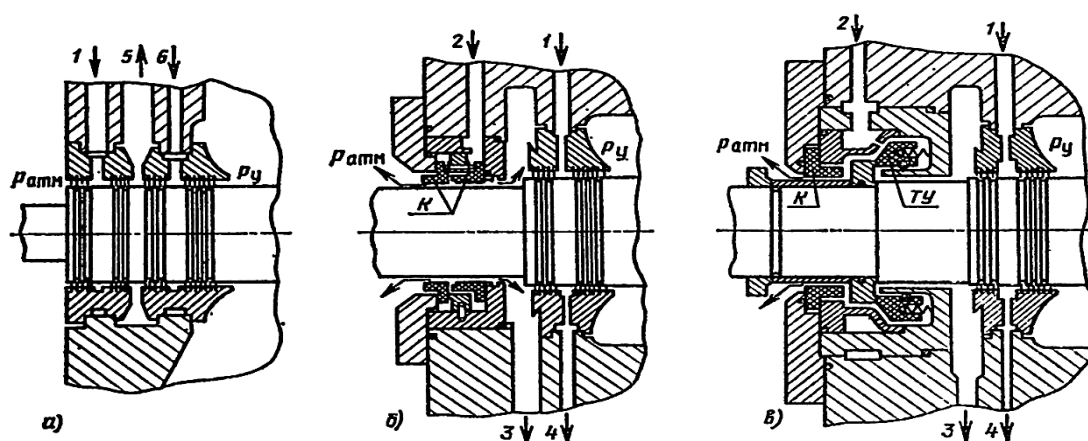
Традиционно для этой цели используются бесконтактные уплотнения (щелевые, лабиринтные, плавающие кольца и др.). Наиболее применяемые в компрессорах: лабиринтные уплотнения, уплотнения с наружным и внутренним плавающими кольцами, между которыми подается запирающее масло под расчетным давлением. Данные конструкции достаточно надежны, но не лишены недостатков: негерметичность на неработающем оборудовании; большие безвозвратные потери масла, особенно при пусках; низкий ресурс плавающих колец; повышенная загазованность масла в баке; колебания перепада давления на внутреннем кольце.

Лабиринтное уплотнение (рис. 1, а) относится к уплотнениям бесконтактного типа, оно состоит из нескольких дроссельных участков, между которыми предусмотрены камеры для подвода и отвода запирающего газа. Дроссельные участки могут располагаться на одном диаметре либо ступенчато.

Уплотнение с плавающими кольцами (рис. 1, б) также относится к бесконтактному типу уплотнений. Оно применяется при высоких уплотняемых давлениях $p_y \leq 7$ МПа. Плавающее кольцо устанавливается на вал с минимальным радиальным зазором 0,05–0,1 мм. Кольца (К) вместе с валом могут перемещаться в радиальном направлении. На рисунке показано уплотнение с двумя плавающими кольцами – внешним и внутренним.

В камеру 2 между кольцами подается запирающая жидкость (масло). Часть жидкости через малый зазор вытекает наружу,

другая часть через внутреннее кольцо попадает в камеру 3. Для предотвращения попадания запирающей жидкости в проточную часть компрессора подводится запирающий газ 1, который через лабиринты частично попадает в проточную часть, частично – в камеру 3, из которой газожидкостная смесь отводится в автоматический разделитель. Однако при непредвиденных остановах и пусках оборудования, пусконаладочных работах часть масла все же попадает в газ.



а – многокамерное лабиринтное; б – с плавающими кольцами; в – торцевое;
 1 – подвод запирающего газа; 2 – подвод запирающей жидкости;
 3 – отвод газожидкостной смеси; 4 – контрольный отбор; 5 – разгрузочная камера;
 6 – уравнивающая камера

Рисунок 1 – Типы концевых уплотнений компрессоров

Более перспективными являются торцевые уплотнения, которые обладают высокой герметизирующей способностью, т. е. уровень протечек через них в несколько раз ниже. Торцевое уплотнение (рис. 1, в) относится к типу контактных механических уплотнений. Оно применяется при высоких давлениях [2].

Уплотнение (ТУ) состоит из не вращающегося подвижного в осевом направлении графитового кольца, уплотняющая поверхность которого находится в контакте с вращающимся кольцом. Для отвода тепла и смазки поверхностей трения подводится запирающая жидкость 2 (масло). Необходимое для охлаждения количество масла дозируется внешним плавающим кольцом (К). Давление запирающей жидкости несколько выше уплотняемого давления p_y , благодаря чему осуществляется постоянный контакт между неподвижным и вращающимся кольцами. Предварительный контакт колец создается комплектом пружин. Уплотняющие поверхности работают в режиме полусухого трения, следствием чего имеет место капельная утечка через уплотнение.

Торцевое уплотнение при остановленном компрессоре не в полной мере обеспечивает герметичность без подвода масла. Ограничения для применения торцевых концевых уплотнений: затруднено уплотнение для холодильных компрессоров при стоянке; уплотняемое давление должно быть не более 7 МПа; при высоком перепаде давления уменьшается перемещение кольца; неприменимо при допустимых малых перетоках запирающей жидкости в газовую полость.

Для решения проблемных вопросов разработана и активно внедряется в компрессорах система газодинамических уплотнений. Состоит из, собственно, уплотнений и системы регулирования и контроля работы уплотнений (стойки управления) [3].

Принцип работы сухого газодинамического уплотнения (ГДУ) основан на образовании газового зазора под действием газостатодинамических сил между торцовыми поверхностями вращающегося диска и невращающегося кольца, которые образуют пару трения (ступень уплотнения). Величина зазора очень мала (2...5 мкм) и зависит от величины возникающего газостатодинамического усилия. Это позволяет свести до минимума утечку газа из полости высокого давления в окружающее пространство и, в то же время, этот зазор исключает механический контакт между уплотнительными поверхностями, что обеспечивает теоретически неограниченный срок службы основных деталей уплотнения. Требуемая величина зазора обеспечивается точно обработанной геометрической формой всех элементов уплотнения, в особенности, диска и кольца, профилированием спиральных канавок на твердосплавном диске и применяемыми материалами (рис. 2).

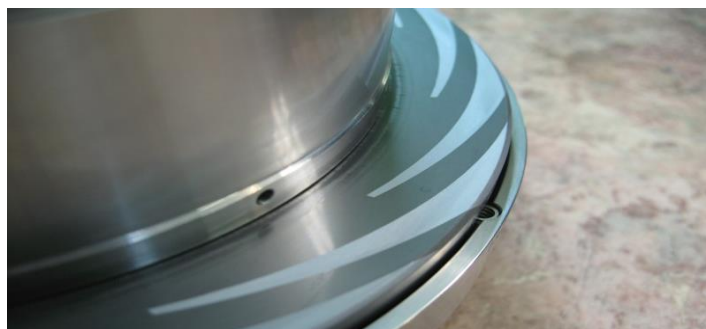


Рисунок 2 – Спиральные канавки на твердосплавном диске

Вращающийся диск изготавливают из твердосплавных материалов, таких как карбид вольфрама, карбид кремния, нитрид кремния. Диск закрепляется на роторной части уплотнения которая, в свою очередь, крепится на валу и вращается вместе с ним. На уплотнительной торцевой поверхности диска выполнены спиральные канавки (одна-направленные или реверсивные) глубиной несколько микрон.

Невращающееся кольцо изготавливают из графита с антифрикционными пропитками или карбида кремния со специальным покрытием. Кольцо закрепляется в корпусе статорной части уплотнения оно подвижно в осевом направлении и прижимается к диску пружинами. Пружины передают усилие через упорное кольцо на резиновое кольцо, которое, в свою очередь, передает усилие на графитовое кольцо.

Когда ротор компрессора вместе с диском начинает вращаться, уплотняемый газ с периферии диска захватывается канавками и втягивается внутрь, к основанию канавки. Набегающий поток газа в конце канавки наталкивается на её основание, которое создает сопротивление потоку, и за счет этого происходит приращение давления. Созданное давление разъединяет соприкасающиеся торцовые поверхности графитового кольца и диска. Графитовое кольцо «всплывает» на газовом слое. Через образовавшийся зазор, называемый уплотнительным, между диском и графитовым кольцом дросселируется небольшое количество рабочего газа. Эта утечка газа выбрасывается на свечу.

По конструктивному исполнению сухие уплотнения подразделяются на одинарные, двухсторонние и двойные (тандемные). В большинстве случаев, в современных компрессорных гидромашинах применяются двойные тандемные уплотнения.

Из приведенного выше видно, что работы по совершенствованию существующего оборудования являются огромным полем для исследований и совершенствования технологий. Разработка новых технологий обработки материалов и методик проектирования и конструирования отдельных узлов и деталей машин позволяют повышать производительность, снижать расходы на эксплуатацию, повышать безопасность ведения технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронежский, А. В. Современные центробежные компрессоры. / А.В. Воронежский. – М.: Премиум Инжиниринг, 2007. – 140 с.
2. Научно-производственный центр АНОД [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anod.ru/sovremennyye-uplotneniya-vala-czentrobezhnyix-kompressorov-i-nagnetatelej.html> (Дата обращения: 30.01.2025);
3. АО "ТРЭМ Инжиниринг" [Электронный ресурс]. URL: <https://tremseals.com/> (Дата обращения: 30.01.2025);
4. ООО «ПРОМТЕХФИЛЬТР» [Электронный ресурс]. URL: <https://ptfilter.ru/> (Дата обращения: 01.02.2025).

Д.Г. Калишук, доц., канд. техн. наук;

Е.Г. Федарович, асп.;

А.Э. Левданский, зав. кафедрой, д-р техн. наук;

Н.П. Саевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИТЧАТЫХ ТАРЕЛОК

На ПУП «ФреБор» (г. Борисов) производят полые полисульфоновые волокна, используемые в дальнейшем при изготовлении гемодиализаторов. При производстве полисульфоновых волокон образуются жидкие отходы, содержащие ценные компоненты (диметилацетамид и деминерализованную воду). Для извлечения указанных компонентов и возврата их в основной производственный цикл отходы подвергают регенерации в многоступенчатой ректификационной установке непрерывного действия. Установка включает в свой состав пять тарельчатых колонн с ситчатыми и колпачковыми тарелками [1].

Уменьшение спроса на гемодиализаторы повлекло сокращение объема их производства ПУП «ФреБор» и, соответственно, снижение количества отходов, поступающих в установку регенерации. Колонны установки при сниженной нагрузке работают нестабильно, не обеспечивая при этом требуемого качества регенерированных продуктов. Эксплуатация установки регенерации в полунепрерывном режиме вызывает повышенные удельные расходы энергоносителей и усложняет управление процессом. Замена установки на подобную уменьшенной производительности требует больших капиталовложений.

В результате проведенных обследования и анализа работы установки регенерации было выявлено следующее. Нестабильность ее технологических параметров, снижение качества регенерированных продуктов при уменьшении производительности возникает за счет перехода ситчатых тарелок колонн DE1–DE4 из эффективного пенного в недопустимый из-за низкой эффективности провальный режим [2]. Нами ранее аналитически доказано [1], что провальный режим при работе ситчатых тарелок, подобных тарелкам колонн DE1–DE4 (относительное свободное сечение их отверстий $f_{св}$ составляет от 0,063 до 0,077 м²/м²), при линейной плотности орошения сливного порога $L_v \leq 0,0007$ м³/(м·с) наблюдается, если фактор паровой нагрузки для потока в отверстиях $F_{s,o} \leq 8,7$ Па^{0,5}. Величина $F_{s,o}$ связана с величиной

фактора паровой нагрузки, определяемого в расчете на полное сечение тарелки, F_s , Па^{0,5}.

Значения F_s и $F_{s,o}$ рассчитывают по формулам:

$$F_s = w_y \sqrt{\rho_y};$$
$$F_{s,o} = \frac{F_s}{f_{св}},$$

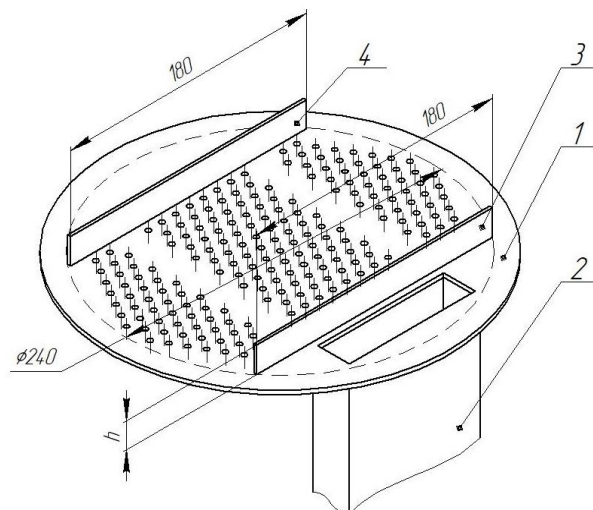
где w_y – фиктивная скорость пара (газа) через тарелку, м/с; ρ_y – плотность пара (газа), кг/м³.

При номинальной проектной производительности установки расчетные значения F_s в колоннах DE1–DE4 находятся в пределах от 0,60 до 0,67 Па^{0,5} (диапазон $F_{s,o}$ от 7,8 до 10,5 Па^{0,5}). При предполагаемой снижении производительности установки регенерации в два раза расчетное значение $F_{s,o}$ для существующих тарелок колонн DE1 DE4 будет находиться в диапазоне от 3,9 до 5,3 Па^{0,5} (F_s при этом – от 0,30 до 0,34 Па^{0,5}). Указанное подтверждает предположение о работе тарелок в данном случае в неэффективном провальном режиме.

Авторами доклада было разработано техническое предложение по модернизации установки регенерации с сохранением непрерывного режима ее работы, не требующее замены существующих ректификационных аппаратов [3]. Сущность модернизации заключается в изменении конструкции массообменных тарелок колонн. Основной особенностью этого изменения является уменьшение $f_{св}$ тарелок колонн DE1–DE4 (за счет уменьшения $f_{св}$ предполагается исключить провальный режима работы при сниженной производительности).

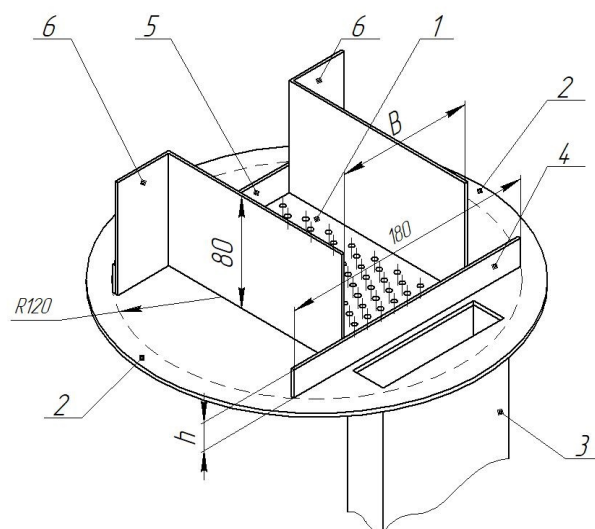
Экспериментальное определение максимальных значений F_s и $F_{s,o}$, при которых существует провальный режим работы, было проведено для двух модельных тарелок. Первая из них подобна существующим в колоннах DE1–DE4 (рис. 1), она имеет $f_{св} = 0,063$ м²/м². У второй модельной модернизированной тарелки (рис. 2) за счет наличия боковых глухих секций величина $f_{св}$ сокращена до 0,031 м²/м². На модернизированной тарелке также установлены перегородки для обеспечения движения жидкости через зону выхода газа из отверстий. Обе модельные тарелки, подобно тарелкам в колоннах DE1–DE4, имеют отверстия диаметром 4 мм, расположенные в шахматном порядке с шагом 11 мм.

При экспериментах модельными средами являлись воздух и вода. За счет изменения расхода воздуха значение F_s варьировалось от 0,41 до 2,63 Па^{0,5} ($F_{s,o}$ для тарелки по рис. 1 – от 6,5 до 41,7 Па^{0,5}, для тарелки по рис. 2 – от 13,1 до 51,6 Па^{0,5}). Линейная плотность орошения сливного порога тарелок составляла от $2,5 \cdot 10^{-5}$ до $15 \cdot 10^{-5}$ м³/(м·с).



1 – основание тарелки; 2 – сливная труба; 3 – сливной порог; 4 –переливной порог

**Рисунок 1 – Модельная тарелка, подобная существующим
в колоннах DE1–DE4**



1 – перфорированная секция; 2 – глухие секции; 3 – сливная труба;

4 – сливной порог; 5 –переливной порог; 6 – перегородки

Рисунок 2 – Модельная модернизированная тарелка

Объекты исследований – модельные тарелки, при проведении опытов находились в колонке с прозрачными стенками. Поэтому существование того или иного режима работы тарелок устанавливалось визуальными наблюдениями. Обильный провал жидкости в виде струй через отверстия модельных тарелок по рис. 1 с неразвитым пенным слоем на них наблюдался при $F_{s.o} \leq 7,0 \text{ Па}^{0,5}$. В диапазоне $7,0 \text{ Па}^{0,5} < F_{s.o} < 10 \text{ Па}^{0,5}$ отмечен провал жидкости в виде отдельных капель при наличии активного пенного слоя.

Верхней границей высокоэффективной работы ситчатых тарелок являются минимальные значения F_s и $F_{s.o}$, при которых возникает струйный режим их работы [2]. Экспериментально установлено, что струйный режим работы модельных тарелок, представленных на рис. 1, начинает проявляться при $F_{s.o} > 17 \text{ Па}^{0,5}$ ($F_s > 1,07 \text{ Па}^{0,5}$) и становится устойчивым при $F_{s.o} > 25 \text{ Па}^{0,5}$ ($F_s > 1,58 \text{ Па}^{0,5}$). Для тарелок, изображенных на рис. 2, струйный режим работы начинает проявляться при $F_{s.o} > 25 \text{ Па}^{0,5}$ ($F_s > 0,78 \text{ Па}^{0,5}$) и становится устойчивым при $F_{s.o} > 34 \text{ Па}^{0,5}$ ($F_s > 1,05 \text{ Па}^{0,5}$). Аналитически определенные приближенные значения $F_{s.o}$ для реально существующих тарелок ректификационных колонн DE1–DE4 и для модернизированных тарелок этих аппаратов соответствуют области высокоэффективного пенного режима их работы. Вторым фактором, определяющим область предельных максимальных значений F_s и $F_{s.o}$ при использовании массообменных тарелок, в том числе и ситчатых, является допустимый относительный унос жидкости e_x , кг/кг. В научной литературе указано, что для эффективной работы тарелок e_x не должен превышать 0,1 кг/кг [2]. В результате экспериментальных исследований установлено, что допустимое значение e_x для модернизированных тарелок наблюдается при $F_s < 1,1 \text{ Па}^{0,5}$.

Вывод: концепция модернизации ситчатых тарелок колонн DE1–DE4 с обеспечением их работы в высокоэффективном пенном режиме выбрана правильно, что подтверждено экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ технологических параметров колонн ректификационной установки / Д. Г. Калишук [и др.] В сб. Химическая технология и техника: материалы 88-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. [Электронный ресурс]. Белорус. гос. технол. ун-т; отв. за издание И. В. Войтов. Минск, 2024. – С. 134 – 137.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
3. Концепция модернизации ректификационных колонн установки регенерации продуктов производства полисульфонового волокна / А. Э. Левданский [и др.] В сб. НЕФТЕГАЗОХИМИЯ-2022: материалы V Международного науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 2–4 ноября 2022 г. Минск: БГТУ, 2022. С. 222–225.

ПОДБОР ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ЧАСТИЦ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА И ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

Одной из ключевых проблем в области рециклинга полимеров является разделение смесей полимерных отходов из-за схожести физических свойств компонентов. Существует много методов разделения. Выбор метода зависит от типа полимера, доступности технологий и экономических соображений. Пенная флотация выделяется среди других методов своей высокой эффективностью и экономичностью, что делает ее предпочтительным выбором во многих случаях [1–3].

Пенная флотация представляет собой процесс обработки смеси пластмасс раствором, содержащим поверхностно-активные вещества ПАВ [4,5]. Наличие ПАВ может менять гидрофильные и гидрофобные свойства определенных видов полимеров. В водной среде пузырьки газа приводят к образованию пены, способной поднимать гидрофобные частицы пластмасс на поверхность, за счет чего и происходит разделение смеси пластмасс на компоненты.

Процесс пенной флотации смесей пластмасс зависит от многих факторов которые влияют на эффективность разделения. Одним из ключевых факторов является природа и концентрация ПАВ [6].

В рамках выполненных исследований использовались частицы двух типов пластмасс, форма которых близка к цилиндрической: полиэтилентерефталата (ПЭТФ), соответствующего стандарту ГОСТ Р 51695-2000, и полифениленсульфида (ПФС), отвечающего техническим условиям ТУ 2224-001-86535236-2016. Размер частиц составлял от 3 до 4 мм, диаметр – от 2 до 3 мм. Плотность материалов составляла 1390 ± 10 кг/м³ для полиэтилентерефталата и 1370 ± 10 кг/м³ для полифениленсульфида, что способствовало созданию стандартизованных и однородных условий для экспериментов.

В состав используемых ПАВ входили полисорбат 80 и лаурет-3 сульфосукцинат натрия. Лаурет-3 сульфосукцинат натрия (Setasin 103, производства компании «Zschimmer&Schwarz», Италия) является анионным поверхностно-активным веществом и представляет собой прозрачную бесцветную жидкость с вязкостью примерно 220 мПа·с при температуре 25°C, с химической формулой – $C_{12}H_{25}SO_4Na$. Полисор-

бат 80 (ТВИН 80, произведенный компанией «АиС», Россия) – неионогенное ПАВ, которое обладает консистенцией вязкой маслянистой жидкости светло-желтого цвета и вязкостью около 450 мПа·с при 25°С. Химическая формула вещества – $C_{64}H_{124}O_{26}$.

Эксперименты проводились с использованием установки, работающей в периодическом режиме и пневматической аэрацией рабочего раствора. Флотационная колонна, изготовленная из прозрачного оргстекла, заполнялась раствором (ПАВ). Для равномерного распределения пузырьков воздуха по поперечному сечению аппарата в его нижней части установлен аэратор. Расход воздуха регулировался помощью вентиля и ротаметра. Смесь пластмасс загружалась через ячейковый питатель, расположенный в верхней части колонны. Для отвода пенного концентрата методом слива предусмотрена постоянная циркуляция рабочего раствора. Пенный продукт поступал по сливному желобу в сепаратор, где происходило разделение твердой фракции концентрата и рабочего раствора. После завершения эксперимента осевшие частицы пластмасс извлекались после опустошения колонны.

Полученные твердые фракции концентрата и остатка промывались водой и высушивались. Для определения доли каждого типа пластмасс в концентрате и остатке проводилась ручная сортировка по цвету и взвешивание.

Поверхность частиц ПЭТФ проявляла гидрофобные свойства, что приводило к образованию комплексов «пузырек – частица» при подаче воздуха. Эти комплексы всплывали в концентрат. В то же время поверхность частиц ПСФ проявляла гидрофильные свойства, что приводило к смачиванию частиц рабочим раствором и их оседанию на дно колонны под действием силы тяжести.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали степень извлечения флотируемого компонента и чистоту его концентрата по формулам:

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{конц}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100\%,$$

$$\varphi = \frac{m_{\text{конц}}}{m_{\text{к}}} \cdot 100\%.$$

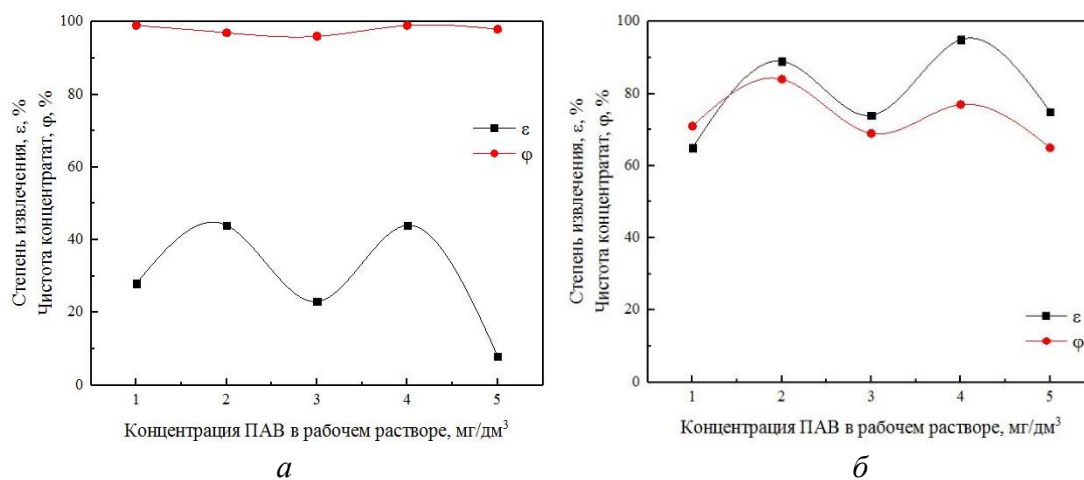
где $m_{\text{конц}}$ – масса ПЭТФ компонента в концентрате, кг; $m_{\text{исх}}$ – масса ПЭТФ компонента, поданного на флотацию, кг; $m_{\text{к}}$ – масса концентрата, кг.

Влияние концентрации Setasin 103 на эффективность флотационного разделения исследуемой смеси пластмасс представлено на

рис. 1а. Исследования проводились при расходе воздуха $3,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, температуре рабочего расхода 13°C , процентное соотношение ПЭТФ : ПФС составляло 50 : 50.

Анализируя рис. 1а, можно сделать вывод о том, что процесс флотационного разделения демонстрирует нестабильные значения эффективности процесса, которые не превышают отметку в 50%.

На рис. 1б представлено исследование влияния концентрации ТВИН 80 на эффективность флотационного разделения. Условия экспериментов те же: процентное соотношение компонентов смеси 50: 50, расход воздуха $3,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, температура рабочего расхода 13°C .



а – при различных концентрациях Setasin 103 в рабочем растворе;

б – при различных концентрациях ТВИН 80 в рабочем растворе

Рисунок 1 – Зависимости степени извлечения ПЭТФ и чистоты концентрата

Исследования показывают, что степень извлечения достигает 94%. Тем не менее, частицы ПФС демонстрируют слабые гидрофобные характеристики, что приводит к их частичному всплыванию в концентрат. В результате, чистота получаемого концентрата составляет от 70 до 80%.

Нами было сделано предположение, что комбинирование двух типов ПАВ может улучшить процесс флотации за счет синергетического эффекта, который может возникнуть при их взаимодействии. Это может привести к более высокой эффективности разделения за счет лучшего контроля над гидрофобностью частиц и стабилизации пены.

На рис. 2 представлены зависимости степени извлечения ПЭТФ и чистоты концентрата от концентрации ПАВ в рабочем растворе, полученные при расходе воздуха $3,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и температуре рабочего раствора 13°C .

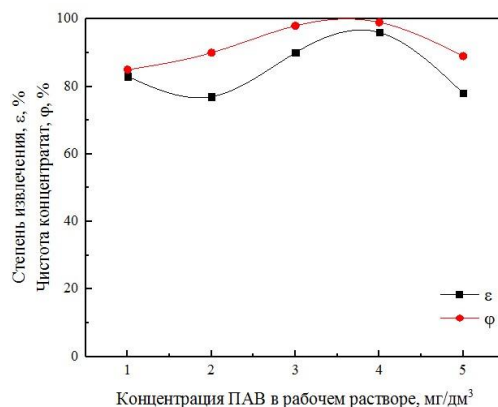


Рисунок 2 – Зависимости степени извлечения ПЭТФ и чистоты концентрата от концентрации ПАВ и соотношения его компонентов в рабочем растворе

Комбинирование ПАВ, таких как Setasin 103 и ТВИН 80, действительно привело к улучшению процесса флотационного разделения исследуемой смеси ПЭТФ и ПФС. Для условий нашего эксперимента, концентрация 2,5 мг/дм³ Setasin и 5,0 мг/дм³ ТВИН 80 позволила достичь эффективности более 95%.

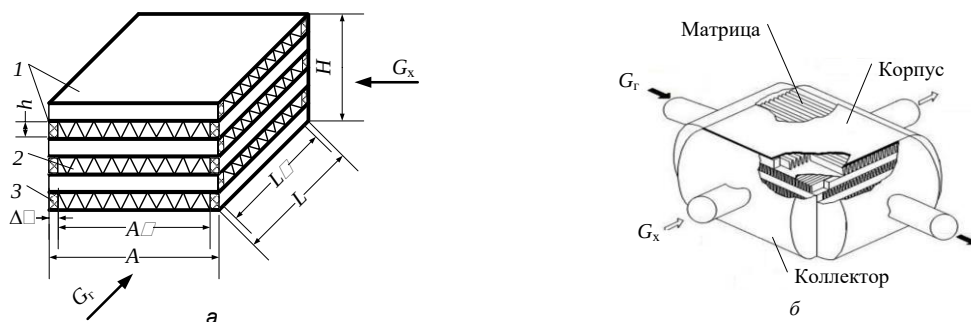
ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э. Исследование факторов, влияющих на процесс флотационного разделения смеси полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирола // Труды БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2023. № 2. С. 35-41.
2. Изучение влияния концентрации поверхностно-активных веществ на процесс флотационного разделения измельченных пластмасс / А. Э. Левданский [и др.] // Вестник КазННТУ. – 2019. – №6. – С. 893-900.
3. Moro K., Dechie D.A. The Use of Froth Flotation for Selective Separation of Plastic Wastes from Soil // European Journal of Engineering and Technology Research. – 2021. – Vol. 6, no 4. – P. 135–138.
4. Kokkılıc O., Mohammadi-Jam S., Chu P., Marion C., Yang Y., Waters K.E. Separation of plastic wastes using froth flotation - An overview // Advances in Colloid and Interface Science. – 2022. – Vol. 308. – P. 102769.
5. Fagkaew P., Chawaloeshonsiya N., Bun S., Painmanakul P. Improving the separation of PS and ABS plastics using modified induced air flotation with a mixing device // Recycling. – 2022. – Vol. 7, no 4. – P. 44.
6. Nagy M., Skvarla J., Sisol M. A possibility of using the flotation process to separate plastics // Annals of faculty engineering Hunedoara – international journal of engineering. – 2011. – Vol. 3. – P. 275–278.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА МИНИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА

Пластинчато-ребристые теплообменные аппараты относятся к числу наиболее компактных устройств с малой массой [1]. Они характеризуются высокими коэффициентами теплоотдачи, для чего используются развитые ребристые поверхности теплообмена. Их применение особенно целесообразно, когда осуществляется теплообмен между двумя газовыми потоками, так как при этом развитая поверхность может быть эффективно использована на обеих сторонах аппарата, что позволяет сосредоточить в единице объема большую поверхность теплообмена [2]. В тоже время, отсутствует описание метода расчета данного типа теплообменников, которые обладают минимальным объемом [1-6].

Минимальный объем аппарата характеризуется кубической формой теплообменной матрицы, что соответствует схеме течения теплоносителей с перекрестным током, показанной на рисунке. Рассмотрим методику расчета аппарата газ-газ. В качестве исходных конструктивных параметров задается тип оребрения с численными значениями толщины ребер, шага оребрения, расстояние между разделительными пластинами, толщины их и проставок. Исходными режимными параметрами являются тепловой поток аппарата Q , расходы теплоносителей и их температуры на входе в теплообменник.



Теплообменная матрица (а) и аппарат в сборе (б) с потоками горячего G_r и холодного G_x теплоносителей:

1 – пластины, разделяющие потоки; 2 – профильная насадка; 3 – проставка

Рассмотрим последовательность расчета аппарата. Вначале рассчитываются вспомогательные параметры: гидравлический эквивалентный диаметр, коэффициент сужения, коэффициент оребрения и соотношение между площадью ребер и всей оребренной поверхно-

стью, численные значения которых определяются конкретным типом используемого оребрения: прямоугольного, треугольного, трапециевидного или с другими особенностями. Далее проводится тепловой конструктивный расчет с целью определения габаритов теплообменной матрицы кубической формы. В основе, которого, лежит замкнутая система уравнений теплопередачи и теплового баланса.

На основе заданного теплового потока аппарата, входных температур горячего и холодного теплоносителей, их расходов из уравнений теплового баланса определяются температуры потоков на выходе утилизатора. Затем рассчитывается среднелогарифмический температурный напор $\bar{\Delta}t$ с учетом поправки на перекрестный ток.

Следующим шагом является нахождение конвективных и приведенных коэффициентов теплоотдачи. Для чего задаемся начальным приближением набегающей скорости потока холодного теплоносителя и для кубической формы теплообменной матрицы принимаем, что площади фронтальных сечений для прохода холодного $F_{\text{фх}}$ и горячего $F_{\text{фг}}$ теплоносителя равны, т.е. $F_{\text{ф}} = F_{\text{фх}} + F_{\text{фг}}$. В процессе теплового расчета матрицы аппарата $F_{\text{ф}}$ является переменной величиной.

Для заданной скорости холодного теплоносителя находим текущее значение фронтального сечения $F_{\text{ф,и}}$, для которого определяем скорость горячего теплоносителя с учетом его расхода и плотности. В первом приближении теплообменная матрица имеет размеры

$$A'_i = L'_i = H'_i = (A - 2\Delta') = (L - 2\Delta') = (H - n_i \Delta) = \sqrt{2F_{\text{ф,и}}}. \quad (1)$$

Общее число разделительных пластин n_i с округлением до целого значения и их число $n_{h,i}$, соответствующее гладкой поверхности теплообмена

$$n_i = H'_i / h + 1, \quad (2)$$

$$n_{h,i} = n_i - 2. \quad (3)$$

Расчет конвективных коэффициентов теплоотдачи для горячего и холодного теплоносителей проводится с использованием универсальной зависимости [7]:

$$\text{Nu} = 0,1417 \text{Re}^{0,653} (d_r / L)^{0,247}, \quad (4)$$

где $\text{Nu} = \alpha d_r / \lambda$ - число Нуссельта; Re - число Рейнольдса; L - длина канала для сплошных ребер ($L = l$ - длина рассечения для смещенных рассеченных ребер), м; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); λ - теплопроводность газа, Вт/(м·°C).

Приведенные коэффициенты теплоотдачи рассчитываются с учетом тепловой эффективности ребер. После чего определяется текущий коэффициент теплопередачи k_i теплообменного аппарата. Далее из уравнения теплопередачи находим приближение площади поверхности теплообмена:

$$F_i = Q / (k_i \bar{\Delta} t). \quad (5)$$

С учетом (1) получаем квадратное уравнение с искомым размером матрицы A'_{i+1} :

$$n_{h,i} (A'_{i+1})^2 + 2\Delta' n_{h,i} (A'_{i+1}) - F_i = 0. \quad (6)$$

Решением уравнения (6) является следующее приближение ширины матрицы A'_{i+1} , а соответственно длины обтекания L_{i+1} и площади фронтального сечения $F_{\phi,i+1}$ для прохода теплоносителей:

$$A'_{i+1} = \frac{-2\Delta' n_{h,i} + \sqrt{(2\Delta' n_{h,i})^2 + 4F_i n_{h,i}}}{2n_{h,i}}, \quad (7)$$

$$L_{i+1} = A'_{i+1} + 2\Delta', \quad (8)$$

$$F_{\phi,i+1} = (A'_{i+1})^2 / 2. \quad (9)$$

Определяем точность, с которой получено новое значение длины обтекания $\varepsilon = |L_i - L_{i+1}| / L_{i+1}$. Если заданная точность достигается, то расчет завершается. В противном случае, уточняются набегающие скорости потоков приточного и вытяжного воздуха для вновь полученного значения фронтального сечения $F_{\phi,i+1}$, и общее количество разделительных пластин.

Затем расчет повторяется с позиции (1) пока не будет выполнено условие сходимости. После чего рассчитывается истинный объем теплообменной матрицы.

После завершения теплового расчета проводится определение сопротивления трения и мощности, затрачиваемой на прокачку горячего и холодного теплоносителя. Сопротивление трения при течении газа через ребристую поверхность рассчитывается по универсальной зависимости работы [6].

Проведено тепловое проектирование аппарата воздух-воздух с тепловым потоком 13,775 кВт для утилизации теплоты при работе приточно-вытяжной вентиляции в холодный период года. Температура и расход вытяжного воздуха соответственно составляют 27°C и 0,64 м³/с, а приточного –9°C и 0,81 м³/с. Конструктивные параметры

имеют следующие значения: расстояние между пластинами 16 мм, толщина и шаг ребер 0,8 и 4 мм, толщина разделительных пластин и проставок 0,4 и 4,0 мм. Матрица выполнена из стали 1Х13 с теплопроводностью 30,8 Вт/(м²·°С).

Расчет проводился с набегающими скоростями потока воздуха 5,0, 7,5 и 10 м/с. Получено, что во всех случаях результат был идентичен. Отличие длины обтекания L от среднего значения 0,533 м не превышало 2%, а величины объема теплообменной матрицы от среднего 0,153 м³ – 5%, что соответствует удовлетворительной точности разработанной методики расчета пластинчато-ребристого теплообменника минимального объема. Мощности на прокачку вытяжного и приточного воздуха составили 77 и 142 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теплообменникам. Т2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
2. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. – М.; Энергия, 1967. – 224 с.
3. Shah R. K., Sekulib D. R. Fundamentals of heat exchanger design. - New Jersey: Wiley, 2003. – 971 p.
4. Чичиндаев А. В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 224 с.
5. Dewatwal J. Design of compact plate fin heat exchanger. – Rourkela: National Institute of Technology, 2009. – 61 p.
6. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

УДК 66.02.071.7

Д.К. Камалбек, докторант;

А.А. Волненко, проф., д-р техн. наук;

Е.А. Жидебаев, докторант (ЮКУ им. М. Ауэзова, Казахстан);

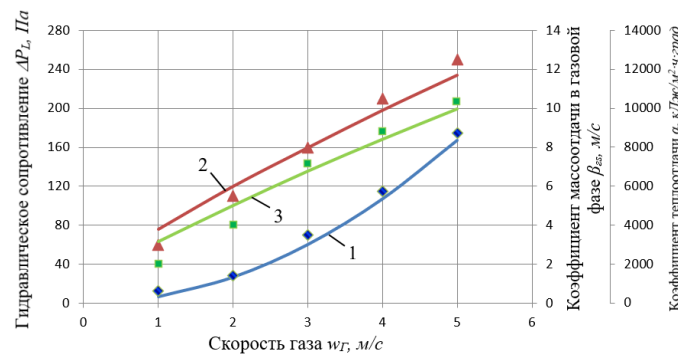
А.Э. Левданский, зав. кафедрой, д-р техн. наук (БГТУ, Минск)

ТЕПЛОМАССООБМЕН В ГАЗООЧИСТНОМ АППАРАТЕ ПРИ ВНЕШНЕМ ОБТЕКАНИИ ТРУБЧАТОЙ НАСАДКИ С ПРЯМЫМИ ТРУБАМИ

Аппараты с насадкой регулярно размещенной в объеме контактной зоны находят широкое распространение при проведении процесса абсорбции, контактного теплообмена и пылеулавливания [1]. Это связано с тем, что в этих аппаратах используется принцип продольно-поперечного секционирования. При этом удается полнее ис-

пользовать энергию газового потока для создания вихревой структуры с малым гидравлическим сопротивлением. Несомненным преимуществом аппаратов с регулярной насадкой является возможность достижения в них режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), зависящего от геометрической формы насадочных тел и шагов расположения элементов в вертикальном направлении.

Выполнение контактного устройства в виде пучка труб, расположенных поперек движению газожидкостного потока, дает дополнительные преимущества, так как в этом случае возможен подвод тепла непосредственно в зону контакта фаз или отвод из нее, что является обязательным условием эффективного проведения многих тепло-массообменных процессов и хемосорбции [2]. Исследования новых конструкций тепло-массообменных аппаратов проводятся на экспериментальных установках в лабораторных условиях. В качестве основных параметров изучаются гидравлическое сопротивление, коэффициенты массоотдачи и теплоотдачи. Гидравлическое сопротивление измеряется чашечным манометром и контролируется прибором типа ДСР. Для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенных к сечению аппарата, используют методику, основанную на изучении процесса адиабатического испарения воды в воздух, а при определении коэффициентов теплоотдачи методику, по определению поля температур. В настоящее время проведены исследования гидродинамических закономерностей, параметров массообмена и теплообмена в аппарате с трубчатой насадкой с прямыми трубами и внешним расположением коллекторов для распределения и сбора теплоносителя, движущегося по трубам [3, 4]. При этом в объеме контактной зоны протекают основные процессы (абсорбции, пылеулавливания и др.) с использованием абсорбента, не смешивающегося с теплоносителем, движущимся по трубам.



Условия опытов: $t_b/d=2$; $t_p/d=2$; $d=25$ мм; $L=25$ м³/м²ч; $t_c=20^\circ\text{C}$.

1 - ΔP_L ; 2 - β_{2s} ; 3 - α .

Рисунок 1 – Зависимость гидравлического сопротивления ΔP_L , коэффициентов массоотдачи в газовой фазе β_{2s} и теплоотдачи α от скорости газа w_T в аппарате с прямыми трубами и внешними коллекторами

На рисунке 1 представлен график зависимостей гидравлического сопротивления, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи.

Как видно из рисунка исследуемые параметры растут с увеличением скорости газового потока. Рост гидравлического сопротивления обусловлен потерями напора потока, затрачиваемого на образование и взаимодействие вихрей в трубчатом пучке аппарата, на изменение направления газового потока, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости. Рост скорости газового потока приводит также к увеличению количества удерживаемой жидкости, времени ее пребывания и турбулентности газожидкостного слоя за счет увеличения числа и мощности образованных вихрей. В случае массообмена, лимитируемого сопротивлением газовой фазы турбулизация газожидкостного потока снижает диффузионное сопротивление, а за счет снижения диаметра капель увеличивается межфазная поверхность – в результате коэффициенты массоотдачи в газовой фазе растут. Аналогичным образом, увеличение коэффициентов теплоотдачи с ростом скорости газа происходит из-за возрастания разности температур по поверхности контакта.

Увеличение плотности орошения показали рост кривых гидравлического сопротивления и незначительное увеличение коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи.

Для расчета гидравлического сопротивления предложено уравнение [5]:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (1)$$

где H – высота насадки, м; ρ_g – плотность газа, кг/м³; ξ_L – коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при взаимодействии вихрей в вертикальном и радиальном направлениях:

$$\xi_L = 0,25 \cdot \theta_v \cdot \theta_r \cdot Re_{ж}^{0,1}. \quad (2)$$

Здесь θ_v – коэффициент, учитывающий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении; θ_r – коэффициент, учитывающий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении; $Re_{ж}$ – число Рейнольдса.

На основе первого закона Фика получено уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе [5]:

$$\beta_{gs} = 10,4 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot \left[\xi_L \cdot \frac{D_z^2 \cdot U_z^3}{\varphi_{яч} \cdot t_b \cdot \nu_z} \right]^{1/4}. \quad (3)$$

С использованием аналогии Льюиса получено уравнение для расчета коэффициентов теплоотдачи:

$$\alpha = 7,28 \cdot \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot c'_p \cdot \left[\xi_L \frac{D_r^2 \cdot U_r^3}{t_\theta \cdot \varphi_{яч} \cdot \nu_r} \right]^{1/4}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) D_e – коэффициент диффузии, м²/с; U_e – истинная скорость газа, м/с; φ – газосодержание, м³/м³; c'_p – теплоемкость, Дж/(кг·К).

Таким образом, для проведения процессов абсорбции и контактного теплообмена показана перспективность применения аппаратов с регулярной насадкой. Описана конструкция аппарата с трубчатой насадкой с прямыми трубами и внешним расположением коллекторов для распределения и сбора теплоносителя. Проведен анализ результатов исследований гидравлического сопротивления, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи описанных аппаратов и предложены уравнения для их расчета.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. – Шымкент, 2015. – 184 с.
- 2 Бекибаев Н.С. Научные основы сопряженных тепло- и массообменных процессов в синфазно-вихревых аппаратах. Дис. ... докт. техн. наук. Шымкент. 2008. – 240с.
- 3 Инновационный патент №27719 Республика Казахстан, МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания/ А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Крганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с.
- 4 Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2017. – 143 с.
- 5 A.A. Volnenko, O.S. Balabekov, B.N. Korganbaev, D. Sarsenbekuly. Purification apparatuses with types of regular packings for chromium salts production // Chemical engineering transactions, Vol.43, 2015. – P. 1147-1152.

R.I. Lankin, Assistant Lecturer;
V.S. Frantskevich, Head of the Department, PhD (Engineering),
(BSTU, Minsk);
Su Hailong, Master's degree student;
Liu Xinyu, Master's degree student
(BSTU, Minsk, China)

INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE ELEMENT OF THE MOVABLE PACKING ON MASS TRANSFER

Mass transfer processes are important in various industries where it is necessary to effectively clean gas emissions and control dust content in the atmosphere. One of the key components determining the efficiency of these processes are the elements of the moving packing, which ensure optimal interaction between the gas and liquid phases. The geometry of these elements is critically important, since it affects the hydrodynamics and, therefore, the intensity of mass transfer [1].

As shown in studies, moving packings are able to adapt to various operating conditions, providing minimal hydraulic resistance and efficient liquid distribution. This is especially important in conditions where there are liquids prone to foaming, or in systems with high liquid : gas ratios. A variety of packing shapes and designs allows designing systems that perform cleaning and absorption tasks with maximum efficiency [2, 3].

Studies show that correctly selected geometric parameters of moving packing elements can significantly increase the efficiency of mass transfer. For example, the presence of "dimples" on the surface of the packing can increase the total contact area between the phases, which promotes more intense interaction and increases the mass transfer coefficient. However, it is important to consider that changes in geometry can also affect hydraulic resistance, which requires careful optimization of designs [4, 5].

This paper examines the effect of the geometry of moving packing elements on mass transfer processes. Experimental studies using various packing shapes, including smooth balls and elements with an offset center of gravity, will be analyzed. The main focus is on how changes in geometry affect hydraulic resistance and the overall efficiency of mass transfer processes [5, 6].

The purpose of this study is to identify the optimal geometric parameters of moving packing elements that will improve the efficiency of absorption processes. The results can be useful for further development and optimization of technologies related to the purification of gases and liquids, which, in turn, helps to improve the environmental situation and reduce the negative impact on the environment. The experimental setup (Fig. 1) is an

absorption column made of organic glass, which allows visual monitoring of the processes occurring inside the apparatus [1]. This design allows researchers to observe the dynamics of the interaction of the gas and liquid phases, as well as the distribution of the packing and liquid flow.

The absorber includes the following components:

- Column – a tube in which the mass transfer process occurs;
- Support and distribution plate – supports the packing elements and distributes the liquid;
- Limiting plate – prevents packing from being carried away from the apparatus;
- Fan – ensures the supply of the gas phase (air) to the column;
- Diaphragm and rotameter – used to measure the flow rate of liquid and gas;
- U-shaped differential pressure gauge – records the pressure drop in the column.

Various types of packing (Fig. 1, 2) [1] were designed and manufactured for the experiments, each of which has a unique geometry, which allows us to study their effect on the efficiency of mass transfer in the absorption column.

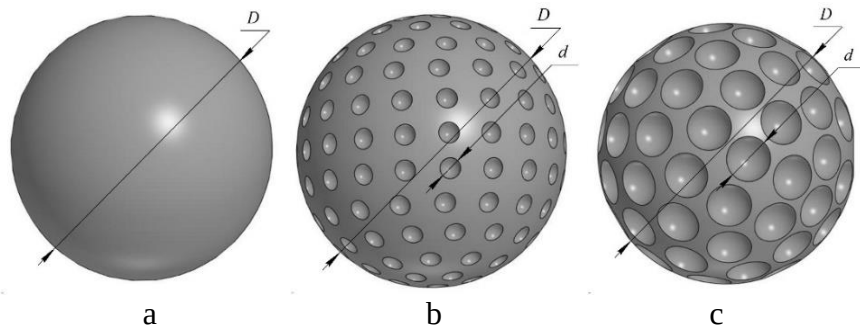


Figure 1 – Spherical packing balls:

- a – smooth sphere; b – sphere with diameter ratio $d/D = 0.075$;
c – sphere with diameter ratio $d/D = 0.225$**

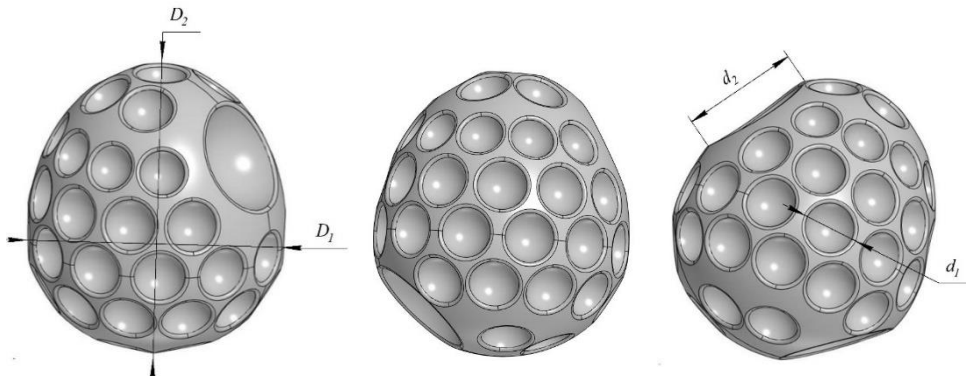


Figure 2 – Packing element with offset center of gravity

All the packings were manufactured using modern technologies such as 3D printing, which ensured high accuracy and uniformity of their sizes and shapes. This minimizes deviations in experimental data and increases the reliability of the results.

In the course of laboratory studies on mass transfer, there is always a need to select a model medium that includes gas and liquid phases. The components of this medium must be easily accessible, safe and non-aggressive for researchers. The key point is that the results obtained under such conditions must be relevant and applicable for assessing the operation of industrial mass transfer devices with real substances. For this work, a model medium for CO₂ desorption from water was selected. The efficiency of mass transfer, expressing the degree of equilibrium achieved during carbon dioxide desorption, is determined by the liquid phase – E_l [7].

The initial and final acidity of the aqueous solution was determined using a pH-meter. Then, using a well-known formula, the pH data were converted into concentration. After that, a graph of the dependence of these data on the time of the experiment was plotted (Fig. 3).

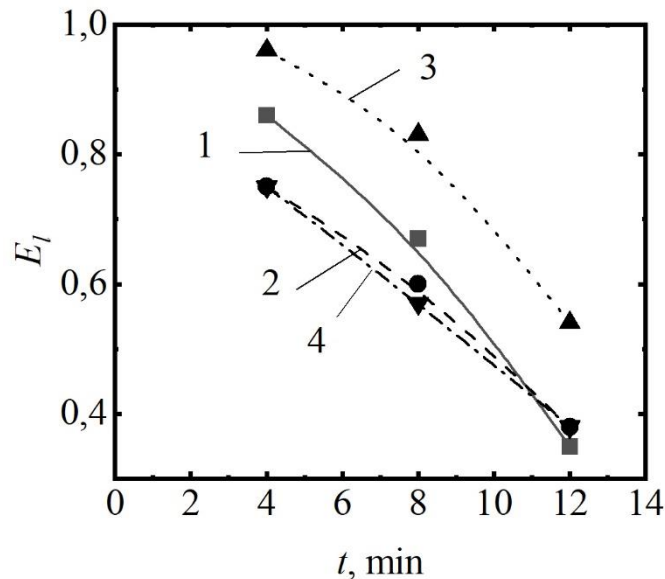


Figure 3 – Efficiency over time: 1 – type 1; 2 – type 2; 3 – type 3; 4 – type 4

The plot (Fig. 3) shows that the efficiency of type 3 packing is higher compared to other types of packing. This is explained by the increased mass transfer surface, which promotes more intense contact between the gas and liquid phases. The increased surface area allows a larger number of molecules to interact, which significantly increases the rate of absorption or desorption processes.

The plot shows how the efficiency (E_l) changes depending on time (t), which allows us to trace the dynamics of changes in mass transfer pro-

cesses. There is a tendency for efficiency to decrease with increasing time, which may indicate that the system is approaching equilibrium. This behavior is typical of many mass transfer processes, where at the beginning there is an active interaction of components, and as equilibrium is reached, the efficiency begins to decrease.

Thus, the results presented in the graph emphasize the importance of choosing the packing and experimental conditions to achieve maximum efficiency of mass transfer processes. These data can be useful in designing new devices and optimizing existing technologies in the chemical and petrochemical industries.

LITERATURE

1. Ланкин, Р.И., Францкевич В.С. Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2. – С. 108–112. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.
2. Заминаян, А.А. Абсорберы с подвижной насадкой / А.А Заминаян., В.М Рамм. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
3. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой / Труды БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2 (259). – С. 107–114.
4. Maćkowiak, J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems / J. Maćkowiak. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
5. Левш, И.П. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдоожиженным (подвижным) слоем орошаемой насадки / И.П. Левш, А.К. Убайдуллаев. Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
6. Балабеков, О.С. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: монография / О.С. Балабеков, А.А. Волненко. Шимкент: GOLDYES, 2015. – 184 с.
7. Рамм, В.М. Абсорбция газов. 2-е Изд., переработ. и доп. / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

Е.Г. Федарович, асп.; С.В. Ярмолик, ст. преп.;
А.Э. Левданский, зав. кафедрой, д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск);
Х.С. Нурмухамедов, проф., д-р техн. наук (ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан)

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА

В настоящее время одним из перспективных направлений развития технологии и техники является замена классических конструкционных металлических сплавов на полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1].

Согласно статистическим данным объем мирового рынка композиционных полимерных материалов в 2022 году составил порядка 10 млн. тонн, что в денежном эквиваленте около 93,5 млрд долларов. По разным оценкам, среднегодовой прирост составляет около 6,2 % [2]. При этом, до 90 % производимых ПКМ приходится на стеклопластики.

В Республике Беларусь, изделия из стеклопластика производятся на ряде предприятий, объединенных в инновационно-промышленный композитный кластер состоящий из порядка 11 организаций. Крупнейшим предприятием из которых является ОАО «Полоцк-стекловолокно», мощность которого по производству стекловолокна и изделий на его основе составляет порядка 57 тыс. тонн в год.

Объемное производство стеклопластика непременно приводит к образованию отходов, что формирует актуальную материаловедческую проблему их утилизации.

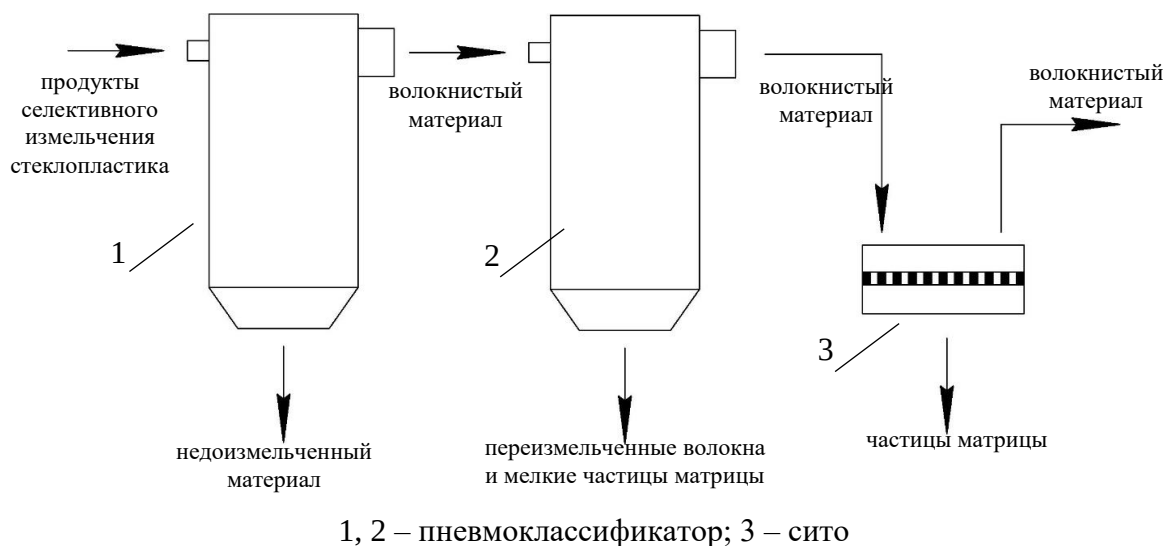
Основным решением проблемы утилизации стеклопластиковых отходов является их вторичная переработка. Рассмотрев возможные и наиболее распространенные методы переработки отходов ПКМ, перспективным с экономической и экологической точки зрения является механический метод. Данный метод имеет ряд преимуществ: сравнительная простота технологического оформления, применимость для практически любых полимерных композиционных материалов, одновременная переработка армирующих волокон и полимерного связующего, отсутствие вредных выбросов и испарений.

Ранее, проведенные нами экспериментальные исследования механической переработки стеклопластиковых отходов показали, что одной из серьезных проблем получения качественного вторичного волокнистого материала является его классификация [3, 4]. Использование механической классификации продуктов селективного измельчения отходов стеклопластика на ситах не позволяет получить волокни-

стый материал надлежащего качества, что связано с особенностями самого материала.

Форма и характер вторичного материала не подходит для классификации просеиванием на сите, так как волокна слипаются и образуют «пушистые комки» на поверхности сит [5, 6]. Эти комки, содержащие как волокна, так и частицы полимерной матрицы, в противном случае были бы классифицированы по последующим ситам с меньшим диаметром отверстий. По мере того, как они накапливаются на поверхности сит, они предотвращают прохождение дальнейших волокон и частиц через поверхность сита.

В результате в вторичном волокнистом материале, присутствуют как мелкие, так и длинные волокна. Мелкие волокна, длина которых меньше так называемой эффективной длины, не в полной мере реализуют свои прочностные свойства в композиционном материале [7]. Помимо этого, в вторичном материале, содержатся частицы смолы, в результате, общее количество стекловолокна в массе снижается, что оказывает негативное воздействие на механические характеристики ПКМ. Для решения вышеперечисленных проблем нами предложено использовать трехстадийную классификацию продуктов селективного измельчения стеклопластиков, состоящую из двух стадий пневмоклассификации в роторно-гравитационном классификаторе, и стадии механической классификации на сите (рисунок 1).



1, 2 – пневмоклассификатор; 3 – сито
Рисунок 1 – Технологическая схема классификации продуктов селективного измельчения стеклопластика

Сущность классификации продуктов селективного измельчения стеклопластиков заключается в следующем.

Стадия 1. Продукты измельчения, состоящие из недоизмельченного стеклопластика, волокнистого материала и частиц измельченной

матрицы подвергаются пневмоклассификации в роторно-гравитационном классификаторе (поз. 1 рис. 1) с установленным расходом воздуха таким образом, чтобы волокнистый материал подхватывался потоком воздуха и направлялся в патрубок выхода мелкой фракции. Неизмельченный материал, в виде пластинок недоизмельченного стеклопластика и скрепленных между собой матрицей пучков волокон, преодолевая силу воздушного сопротивления направлялся в патрубок выхода крупной фракции.

Стадия 2. Полученный волокнистый материал, отделенный от недоизмельченного материала, повторно направляется в пневмоклас-сификатор (поз. 2 рис. 1). В данном случае, скорость потока воздуха снижается до меньших значений, позволяющих отделить от крупных волокон (длинной более 5 мм) переизмельченные волокна и мелкие частицы полимерной матрицы.

Стадия 3. Механическая классификация волокнистого материала на сите (поз. 3 рис. 1) позволяет выделить оставшиеся более крупные частицы полимерной матрицы, скорость витания которых совпадает с скоростью витания длинных волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токменинов, К.А. Перспективы освоения полимерных композиционных материалов в Республике Беларусь // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 2. С. 65–72.

2. Камысов М. Композиты. Из чего строят будущее // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2023. № 3. С. 33–35.

3. Федарович Е.Г. Механическая переработка отходов стеклопластика / Е.Г. Федарович, А.Э. Левданский // международная науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы и перспективы технологических процессов и аппаратов в промышленных отраслях», Ташкент, 27–28 сентября 2024 г./ Ташкентский химико-технологический ин-т. – Ташкент, 2024. – С. 70–76.

4. Федарович Е.Г. Селективное измельчение стеклонаполненных пластиков. Е.Г. Федарович, А.Э. Левданский // 56-я междунар. науч.-техн. конф. препод. и студ.: материалы докладов, Витебск, 19-20 апреля 2023 г.: в 2-х т. / Витебский гос. технол. ун-т; редкол.: Ванкевич Е.В. [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 2023. – Т.1 – С. 499–502.

5. Jutte, R.B. and W.D. Graham, Recycling SMC scrap as a reinforcement, in *Plastics Engineering*. 1991. p. 13–16

6. Jutte, R.B. and W.D. Graham, Recycling SMC, in *46th Annual Conference, Composites Insitiute*. 1991, The Society of the Plastics Industry.

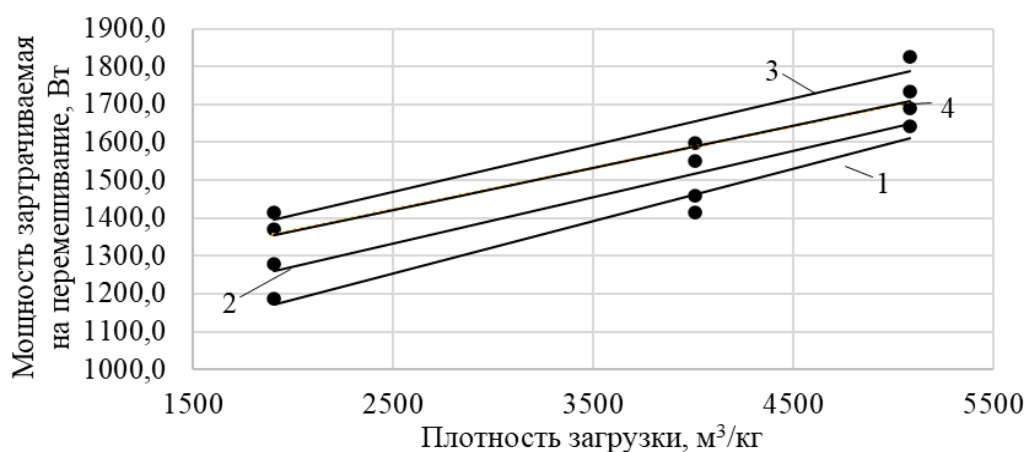
7. Ставров В.П. Механика композиционных материалов: учебное пособие. – Минск: БГТУ, 2008. – С. 165.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ БИСЕРНЫХ МЕЛЬНИЦ

Одним из наиболее емких параметров для оценки работы помольных агрегатов является энергоемкость процесса помола. Она отражает сколько энергии необходимо затратить чтобы получить необходимое количество материала с нужным конечным размером частиц. Чем мельче этот размер, тем больше требуется затратить энергии для его получения.

С учетом этого одной из основных задач в процессе разработки и исследования бисерных мельниц является определение их конструктивных и технологических параметров, которые позволят снизить затраты энергии на получение конечного продукта с минимальным размером частиц.

Первый этап сравнительного анализа вертикальных и горизонтальных мельниц заключался в определении затрат мощности на перемешивание загрузки при использовании различных типов роторов [1]. На полученных графических зависимостях (рисунок 1) наблюдалось линейное увеличение мощности, затрачиваемой на перемешивание при



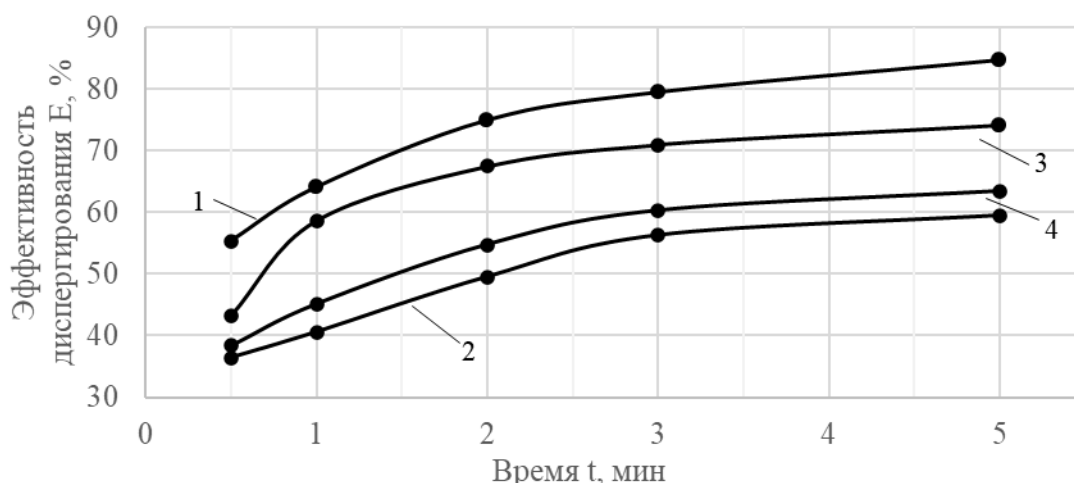
1 – ротор с круглыми дисками; 2 – ротор с треугольными дисками;
 3 – ротор с наклонными дисками; 4 – ротор со штырями

Рисунок 1 – Зависимость мощности, затрачиваемой на перемешивание, от плотности загрузки для горизонтальной бисерной мельницы
увеличении плотности загрузки

В целом можно отметить, что наиболее энергозатратным оказались роторы со штырями и с мешалками в виде наклонных дисков, что обусловлено увеличением сопротивления при взаимодействии с загрузкой из-за штырей и за счет угла наклона. Изменение типа мельницы показало, что вертикальные затрачивают на 300-450 Вт больше энергии на процесс помола чем горизонтальные.

Второй этап заключался в изучении кинетики помола материала в этих двух типах мельниц. Методика проведения экспериментов описана в работе [2]. За определяющий был принят размер в 5 мкм. На графических зависимостях времени измельчения от эффективности диспергирования (рисунок 2) за первые 0,5 минут помола эффективность достигает 35-50%. После 3 минут эффективность увеличивается на 20-30% и далее практически не изменяется.

Наиболее эффективными оказался ротор с наклонными дисками. Его эффективность на 8-10 % выше, чем ротора с треугольными дисками и на 18-25 % чем у роторов с круглыми дисками и со штырями. Это обусловлено тем, что за счет наклона дисков создается нестационарный режим движения загрузки с большим градиентом скорости.



1 – ротор с наклонными дисками; 2 – ротор со штырями;
3 – ротор с треугольными дисками; 4 – ротор с круглыми дисками

Рисунок 2 – Зависимость эффективности диспергирования от времени помола для горизонтальной бисерной мельницы

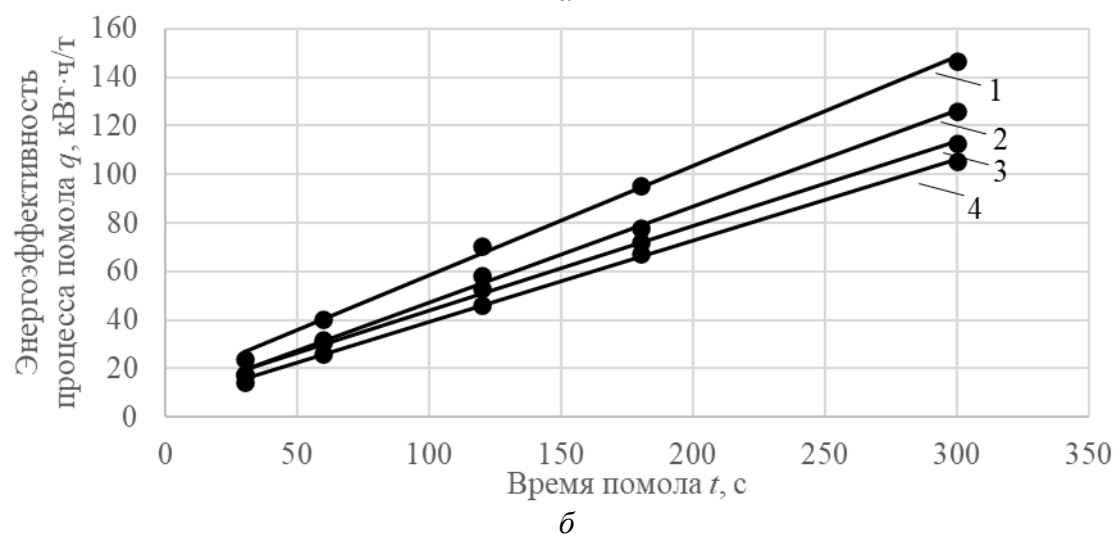
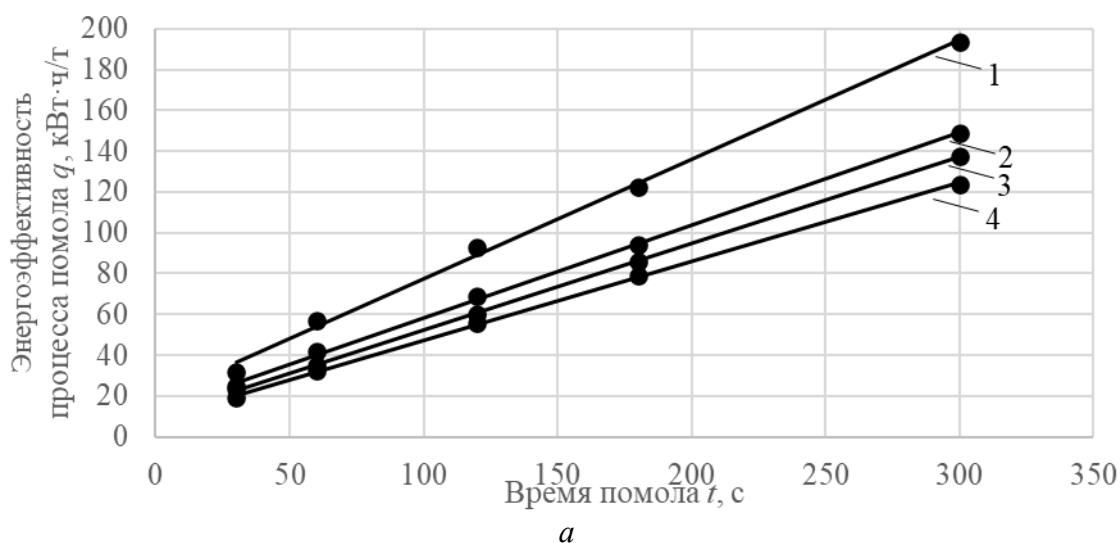
Расположение корпуса также оказывает влияние на эффективность измельчения. В целом у горизонтальной мельницы она выше на 3-10% чем у вертикальной в зависимости от времени измельчения и типа ротора.

На третьем этапе исследований определялась энергоэффективность двух типов мельниц. В нашем случае с целью учета эффектив-

ности диспергирования этот параметр немного отличался от классической формулы и рассчитывался как:

$$q = \frac{Nt}{m \left(\frac{E}{100} \right)}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}} \quad (1)$$

где N – затраты мощности на процесс помола, кВт; t – время обработки материала, ч; m – масса обрабатываемого материала, т; E – эффективность диспергирования, %.



1 – ротор со штырями; 2 – ротор с круглыми дисками;
3 – ротор с треугольными дисками; 4 – ротор с наклонными дисками;
а – вертикальная бисерная мельница; б – горизонтальная бисерная мельница

Рисунок 3 – Зависимость энергоемкости процесса помола от времени помола

Здесь параметр $mE/100$ позволяет получить массу конечного продукта с необходимым конечным размером, т.е. эффективность.

На графических зависимостях энергоэффективность процесса помола от времени помола (рисунок 3) просматривалась линейная зависимость этих параметров.

За первые 30 секунд помола энергоэффективность процесса помола не сильно отличается друг от друга на 5-15 кВт·ч/т. С увеличение времени разница в этом параметре становится значительна и достигает 35-60 кВт·ч/т. Наибольшим значением энергоэффективности процесса помола 150-195 кВт·ч/т, обладал ротор со штырями, в то время как ротор с наклонными дисками показывал 105-125 кВт·ч/т. Все это можно объяснить тем, что хоть и наклон дисков приводит к увеличению затрат мощности на перемешивание среды, но этот ротор обладает большей эффективностью диспергирования.

В целом проведенные исследования показали, что горизонтальное расположение помольной камеры способствует снижению энергозатрат на перемешивание загрузки и увеличению эффективности диспергирования, а это в свою очередь привело к снижению энергоэффективности на 5–50 кВт·ч/т по сравнению с вертикальным расположением.

ЛИТЕРАТУРА

1 Козловский В. И. Изменение мощности привода вертикальной бисерной мельницы в зависимости от конструкции ротора / В. И. Козловский, О. А. Петров, С. Ю. Парда, Д. В. Кульша // Химическая технология и техника: материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 166-169.

2 Козловский В. И. Эффективность вертикальной бисерной мельницы работающей в периодическом режиме / В. И. Козловский, С. Ю. Парда, Д. В. Кульша // Нефтегазохимия – 2024 : материалы VII Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 13–15 ноября 2024 г. – Минск : БГТУ, 2024. – С. 256–259.

РАСЧЕТ СРЫВА ВЛАГИ С ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ШАРООБРАЗНОЙ ЧАСТИЦЫ

При движении частицы в потоке газа характер её движения определяется большим количеством факторов воздействующих на эту частицу. В случае неравномерного распределения скоростей газового потока, твердой частице может быть сообщено вращательное движение. При вращении частицы, на пленку жидкости находящуюся на её поверхности действуют центробежные силы инерции. Эти силы стремятся сорвать пленку жидкости с поверхности частицы.

Нами рассмотрен случай, когда на поверхности сферической частицы радиусом r находится пленка жидкости толщиной δ . Частица с пленкой жидкости вращается относительно некоторой оси с угловой скоростью ω . Пленка жидкости, плотностью ρ , на поверхности частицы удерживается за счет сил поверхностного натяжения σ . Нами был рассмотрен элементарный объем этой пленки и действующие на его силы. Элементарный объем пленки жидкости был вырезан двумя конусами и двумя меридиональными сечениями. Вершины конусов расположены в центре масс шарообразной частицы. Рассмотрены силы, действующие на элементарный объем пленки жидкости и их проекции на ось направленную по радиусу сферы. В момент разрыва пленки проекция всех сил на упомянутую ось равна нулю. Просуммировав полученное выражение по всей поверхности частицы, получено выражение для расчета максимальной толщины пленки жидкости на поверхности вращающейся частицы:

$$\delta = \frac{4 \cdot \sigma}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r^2}$$

Анализ зависимости позволяют сделать вывод, что в случае вращения частицы на срыв пленки жидкости с её поверхности, влияет много параметров: поверхностное натяжение жидкости, плотность жидкости, толщина пленки жидкости (количество жидкости), размер частицы и её угловая скорость вращения.

Если известна конкретная жидкость, которую необходимо удалить с поверхности частиц, получаем зависимость угловой скорости от размера частицы и количества влаги содержащейся на её поверхно-

сти. Следует помнить, что на поверхности конкретной частицы может находиться различное количество влаги, но не более некоторого максимального значения.

На первом этапе нами были выполнены расчеты для различных видов жидкости. Цель расчетов это определение скорости вращения шарообразной частицы обеспечивающей срыв конкретного вида влаги находящейся на её поверхности в зависимости от размера частиц. Для определенности принималось, что на поверхности частицы находится максимально возможное количество влаги. Результаты этих расчетов для воды, бензола и этанола приведены на рис. 1.

Для удобства восприятия результатов, угловые скорости вращения частиц на графиках представлены в виде частоты их вращения с размерностью обороты в минуту. Представленные графики показывают, что срыв влаги с поверхности вращающейся частицы возможен только при очень значительных скоростях вращения частицы.

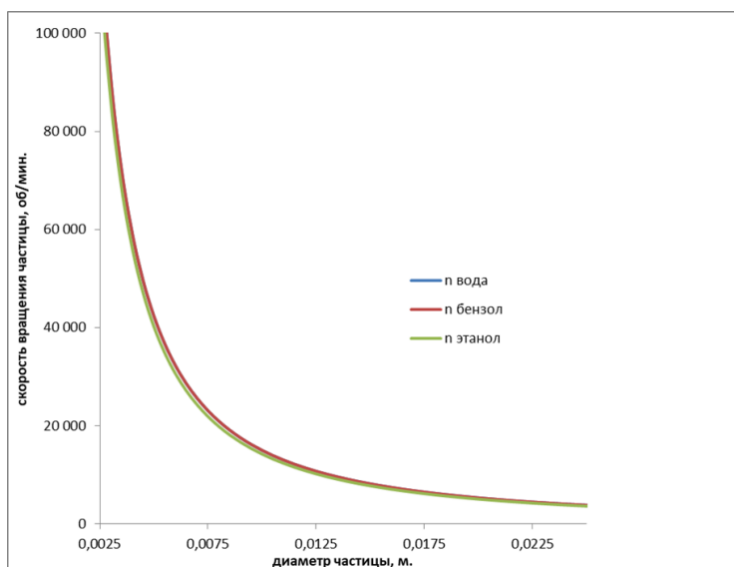


Рисунок 1 – Условия срыва пленки жидкости с поверхности вращающейся частицы в зависимости от вида влаги

Очевидно, что выполненные нами расчеты описывают идеализированную картину процесса срыва влаги. Частицы имеют правильную шарообразную форму, также в расчетах нет учета воздействия на пленку жидкости движущегося газового потока.

Реальные значения скоростей вращения частиц, при которых будет происходить срыв влаги с их поверхности, будут значительно ниже расчетных. При этом, выполненные расчеты позволяют сделать

ряд практических выводов. Срыв влаги с поверхности вращающейся частицы существенно зависит от размера частицы, и в меньшей степени от вида влаги находящейся на её поверхности.

Из литературных источников [1, 2] известно, что скорость вращения частиц движущихся в газовом потоке может достигать до ста тысяч оборотов в минуту.

Исходя из этого, можно утверждать, что удалять влагу с поверхности частиц за счет придания им высокой частоты вращения для частиц размером менее миллиметра нецелесообразно.

Нами также были выполнены расчеты по изучению того как влияет количество влаги находящейся на поверхности частицы на величину минимальной скорости вращения частицы при которой происходит срыв этой влаги. Результаты этих расчетов приведены на рис. 2.

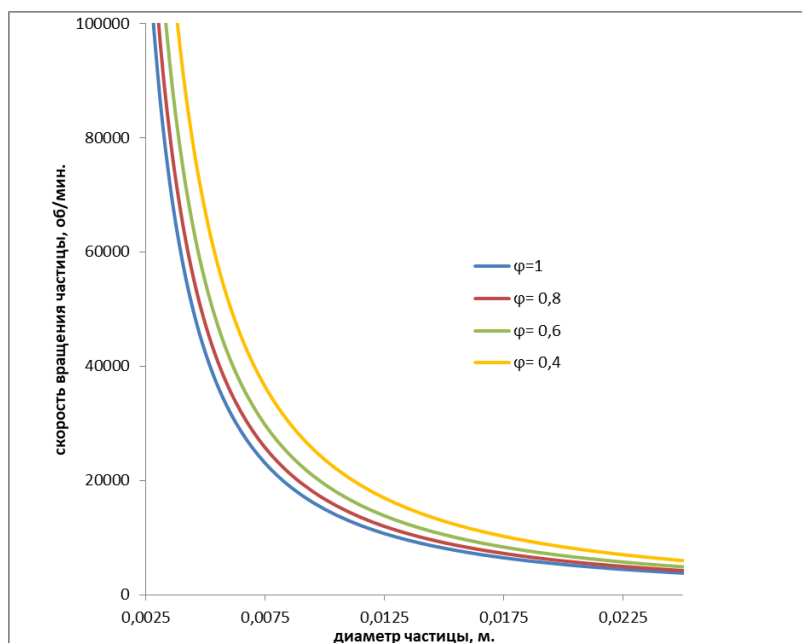


Рисунок 2 – Условия срыва пленки воды с поверхности вращающейся частицы в зависимости от количества воды находящейся на её поверхности

Расчеты подтверждают, что чем меньше влаги на поверхности вращающейся частицы, тем сложнее её сорвать.

В целом результаты расчетов указывают на то, что придание вращения влажным частицам, движущимся в газовом потоке, существенно не изменит условия срыва пленки влаги с их поверхности. Из графических зависимостей, представленных на рис.1 и рис. 2 видно,

что частицам размером менее 1 мм для срыва пленки жидкости необходимо придать частоту вращения порядка 100 000 об/мин.

Для более крупных частиц необходимы частоты вращения, исчисляемые тысячами оборотов в минуту.

Раскрутить частицы до таких высоких скоростей возможно только при создании в газовом потоке высокого градиента скоростей. Частицы приобрести высокие скорости вращения могут также и в результате касательных соударений между собой и со стенками аппарата. Для случаев ударных воздействий на частицы, не имеет значение, какую скорость вращения приобретают частицы в результате этих соударений.

В момент соударений частицы будут испытывать динамические напряжения, которые в соответствии с классическими представлениями «сопротивления материалов» [3] будут в разы превышать статические напряжения при сопоставимых условиях. Как следствие в момент удара с поверхности частиц будет сорвана пленка влаги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабуха, Г.Л., Шрайбер, А.А., Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках, Киев: Наукова думка, 1972, 175 с.
2. Дзядзио, А.М., Кермер, А.С. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях, М.: Колос, 1964 – 324 с.
3. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов, М.: Альянс, 2015. – 608 с.

УДК 66.074.51

С.У. Ганиева, соискатель;

Н.Ш. Худайбердиева, PhD, доц. (НавГМУ, г. Навои, Узбекистан);

Э.Э. Абдулахатов, магистр; Ш.Ш. Матчанов, магистр;

Х.С. Нурмухамедов, проф., д-р техн. наук (ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан)

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВИХРЕВОГО ЦИКЛОНА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ФАЗ

В связи с ухудшающейся экологической обстановкой, проблема очистки промышленных газовых выбросов от газообразных и дисперсных примесей стала проблемой мирового масштаба. В 1997 году в рамках Конвенции ООН по изменению климата принят документ, соответствии с которым все развитые страны и страны с переходной

экономикой обязаны сократить выбросы в атмосферу двуокиси углерода, метана, азотистых соединений, высокодисперсных частиц и других примесей, вызывающих парниковый эффект [1].

Здоровье любой нации зависит от чистоты воздуха окружающей нас среды обитания. Чистый воздух необходим не только для людей, но и для технологических нужд предприятий различных отраслей экономики. Промышленные газовые выбросы могут отрицательно влиять на здоровье многие годы вперед или привести к летальному исходу.

Общеизвестно, любые твердые частицы в воздухе или в газах (или в жидкой фазе) могут значительно повлиять на эффективность работы аппаратов и оборудования, а иногда существенно сократить срок безотказной эксплуатации машин и аппаратов и привести к поломке [2].

Аппараты, в которых происходит непосредственное соприкосновение жидкой и газовой фаз широко применяются в химической, нефте- и газоперерабатывающих, горнодобывающих, энергетических и других отраслях экономики страны [3].

При непосредственном контакте газовой смеси с жидкой фазой происходят не только процесс очистки от твердых частиц, но и тепло- и массообменные процессы. Подобные аппараты работают в системах «газ-жидкость-твердое тело» в различных комбинациях двух агрегатных состояний веществ [4, 5].

Целью данной работы является определение гидравлического сопротивления вихревого мокрого циклона с тангенциальным завихрителем и параллельным вводом жидкой и газовой фаз.

В целях изучения гидравлического сопротивления вихревого мокрого циклона при улавливании твердой фазы из состава запыленного газа спроектирован экспериментальная установка с вводом обеих фаз через один тангенциальный завихритель.

Одним из важных этапов при проектировании экспериментального вихревого циклона являлось выбор эффективной конструкции завихрителя, обеспечивающий максимальную турбулентность при относительно низком гидравлическом сопротивлении. В связи с этим изучено влияние конструкции параллельного ввода обеих фаз через один завихритель на общее гидравлическое сопротивление вихревого аппарата и структуру потоков в цилиндрической камере.

Экспериментальная установка по изучению гидродинамики вихревого аппарата состоит из аппарата с тангенциальным завихрителем, обеспечивающий ввод газовой и жидкой фаз в верхнюю часть цилиндрического корпуса, турбогазодувки с системой измерения расхо-

да, температуры газовой фазы и байпасной линией, а также устройства для ввода твердых частиц, насоса для подачи жидкой фазы с системой измерения расхода и температуры жидкости.

В целях максимальной турбулизации вводимых потоков вращающейся по спирали вниз тангенциальная подача газа и жидкости производилась в параллельном токе. Температура воздуха соответствовала температуре окружающей среды, а воды – температуре в системе водоподачи.

В качестве газовой фазы использован атмосферный воздух, а жидкой фазы – вода.

Диаметр стеклянного корпуса вихревого аппарата 0,068 м, высота 1,5 м. Прозрачность стеклянного корпуса позволит визуально наблюдать за структурой газожидкостного потока в цилиндрической камере. В исследованиях с металлическим корпусом для эффективного отвода налипших на стенках твердых частиц в емкость, на внутренней стенке сделаны плавно очерченные спиральные канавки. На выходе из нижней части аппарата газовой и жидкой фаз для сбора жидкой фазы с твердыми частицами установлена емкость объемом 0,1 м³. Движение газовой и жидкой фаз параллельный ток и оба движутся сверху вниз. Причем, в поток газовой фазы под углом 30° вводится жидкая фаза с более высокой скоростью с целью создания высокотурбулизированного потока. Далее трехфазный поток приобретает вращательное движение и устремляется по спирали в нижнюю часть аппарата. Нижняя часть аппарата имеет небольшой участок внезапного расширения, который служит устройством для гашения скорости газожидкостного потока перед его выходом из аппарата. Жидкая фаза с твердыми частицами собирается в емкость, а газовая фаза содержащая мелкодисперсные капли жидкости отводится из нижней части аппарата и выбрасывается в окружающую среду.

В качестве объекта переработки использовали фракции кварцевого песка с диаметром частиц 50, 63, 125 и 250 мкм.

Исследования по гидравлическому сопротивлению вихревого гидроциклона от скорости потока запыленного газа показали, что функция $\Delta P=f(w)$ имеет восходящий характер во всем диапазоне скоростей (рис.1). При соотношении жидкой L фазы к газовой G фазе равной L/G=1:1 значение гидравлического сопротивления $\Delta P=23$ Па при скорости 3 м/с, при $w=10$ м/с величина $\Delta P=90$ Па, при $w=15$ м/с величина $\Delta P=180$ Па и соответственно при $w=23$ м/с - $\Delta P=236$ Па.

Аналогичный рост гидравлического сопротивления наблюдается и при других значениях соотношения L/G . Разница только в численных значениях, которые увеличиваются с ростом соотношения до $L/G=1:8$.

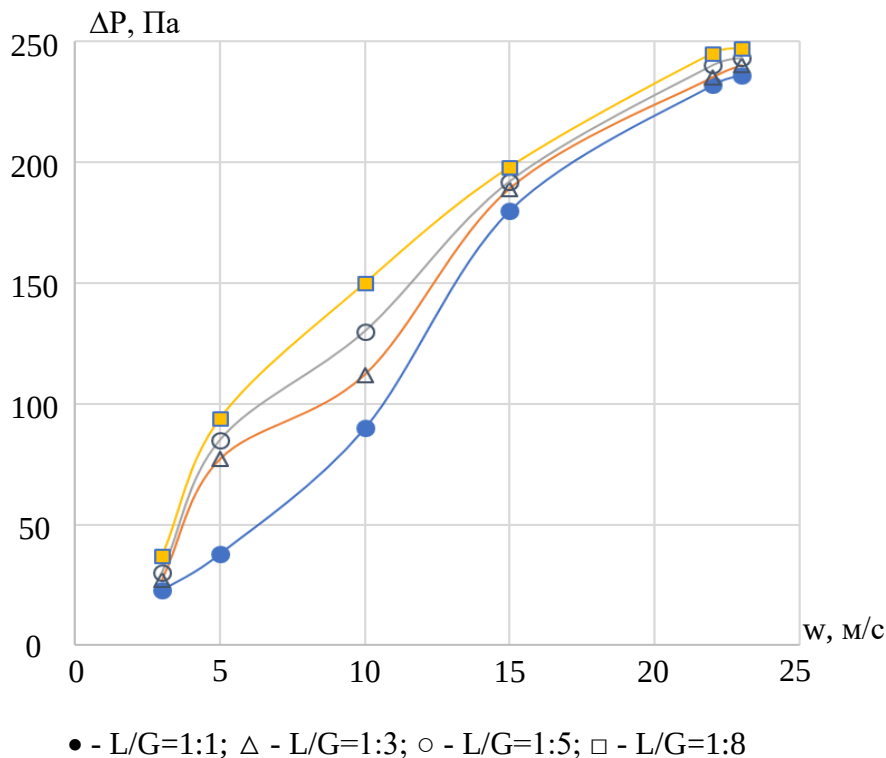


Рисунок 1 – Гидравлическое сопротивление вихревого гидроциклона от скорости запыленного газа.

Общеизвестно, что ввод фаз через тангенциальный завихритель создает центробежные силы как для газовой, так и жидкой фаз, а, следовательно, приводит к росту движущей силы процесса вихревой очистки, что способствует интенсификации разделения газовой неоднородной системы.

Выявлено, что вихревые аппараты с тангенциальными завихрителями обеспечивающие закрученный поток смеси «газ-жидкость» обладают существенными преимуществами при сопоставлении с гидроциклонами с осевым потоком.

Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению вихревого гидроциклона с параллельным вводом обеих фаз через один завихритель показали хорошую корреляцию с опытными данными других исследователей. Следует отметить, что численные значения гидравлического сопротивления намного меньше, чем у аппаратов с двумя и четырьмя завихрителями. Предлагаемая конструкция обеспе-

чивает высокие скорости приводящие к росту турбулентности газожидкостного потока.

Общеизвестно, что коэффициент полезного действия вихревых контактных аппаратов зависит как от интенсивности турбулентности потоков, так и от гидравлического сопротивления мокрого циклона, который определяет энергетические затраты на прокачку газовой и жидкой фаз. Подобные вихревые аппараты обеспечивает высокую степень очистки [6] газовой неоднородной системы относительно при низких гидравлических сопротивлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. – FCCC/INFORMAL/84 – 30 с.
2. Карев А.Н., Тюрин М.П. Эффективность использования аппаратов мокрой очистки выбросов газов в промышленности // «Естественные и технические науки», 2021.- №9.– с.19-25.
3. Юсупбеков Н.Р., Закиров С.Г., Нурмухамедов Х.С. Кимёвий технология асосий жараён ва курилмалари. (Назария. Хисоб. Лойиха). – 2023. – 607 б.
4. Сажин Б.С, Белоусов А.С. Гидродинамические характеристики двухфазных течений в вихревых устройствах // Вестник МГТУ. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2007. – С. 93-97.
5. Санакулов К.С., Бахронов Х.Ш., Ахматов А.А. Новые вихревые аппараты для решения экологических проблем в металлургии. Межд. науч.-техн.конференции, Минск-Солигорск, БГТУ, 2019. – С.101-107. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/30537>.
6. Ганиева С.И., Шералиева О.А., Нурмухамедов Х.С., Нигмаджанов С.К. Влияние конструктивных параметров аппарата на эффективность мокрой очистки запыленного газа / Сб. трудов 1-ой межд. конф. РАСЕ-2024, Т.: ТХТИ. – С.41-45.

УДК 661.333.32.081.2

А.Э. Левданский, проф., зав. кафедрой, д-р техн. наук;

Е.Г. Федарович, асп. (БГТУ, г. Минск);

Ж.В. Султанов, ст. преп.; О.А. Шералиева, доц., канд. техн. наук

(ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан);

С.Х. Нурмухамедов, канд. техн. наук (АО «Махам-Чирчик», г. Чирчик)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ В ТУРБОЛОПАСТНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

В последнее время актуальным становится проблема создания энергоэффективных и ресурсосберегающих угольных ТЭС нового поколения, а также модернизация существующих станций, отвечающие самым строгим нормам экологической чистоты выработки электроэнергии и тепла с утилизацией образующихся отходов [1].

Общеизвестно, что к низкосортным углям относят все количества бурых углей и часть каменных углей с зольностью свыше 25%. Переработка низко реакционного топлива с целью получения энергии методом газификации является весьма перспективным направлением, способным обеспечивать высокую эффективность и высокие энергетические показатели производства.

Основными направлениями переработки бурых углей являются: механическое и; термическое обогащение; сжигание; термолиз; газификация; гидрогенизация; экстракция и термическое растворение; производство адсорбентов. Для успешной организации любого из вышеперечисленных способов необходима предварительная переработка твердых топлив, в частности, измельчение.

В настоящее время предложены разнообразные методы газификации, отличающиеся, главным образом, крупностью перерабатываемого твердого топлива, способом его подачи в газогенератор, температурой газификации, давлением в газогенераторе, составом дутья, а также проведением процесса без подачи тепла из постороннего источника и с подачей тепла – соответственно, адиабатические и аллотропические процессы.

Известна работа посвященная одному из методов газификации низкореакционного твердого топлива в восходящем потоке, активированного нанокатализаторами окислителя [2]. Из работ многих исследователей видно, что основными направлениями переработки углей являются: механическое обогащение; сжигание; термолиз; газификация; гидрогенизация; экстракция и термическое растворение; производство сорбентов.

Некоторые ученые исследовали «подземную газификацию углей» как альтернатива существующим технологиям добычи угля [3], в одной работе предлагают несколько вариантов «подземной газификации углей», в частности, очищенный газ не содержит сероводород, а, следовательно, при сгорании не выделяет сернистого ангидрида; в газе, полученном на кислородном дутье, не содержится оксидов азота [4].

Одним из перспективных методов измельчения твердых материалов является измельчение в аппаратах турболопастного типа [5].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования процесса измельчения твердых углеводородов, в частности, бурого угля Ангренского месторождения, являющегося низко-реакционным топливом. Для достижения поставленной цели авторами предложен метод измельчения бурого угля в трехзонном измельчителе турболопастного типа [6].

Конструкция аппарата включает цилиндрический корпус изготовленный из нержавеющей стали X18H10T диаметром 0,150 м, толщиной 0,006 м и длиной 1,5 м, внутри которого по горизонтальной оси расположен вал с клиновидными стержнями оба конца. Вала установлены на подшипниках и посажены в стакан, который на скользящей посадке вращается внутри втулки. Вал осуществляет как вращательное, так и возвратно-поступательное движение. Для осуществления вращательного движения конец вала, находящийся на стороне зоны загрузки, соединен с электродвигателем при помощи муфты специальной конструкции.

Аппарат для измельчения имеет 5 зон: загрузки “А”, грубого измельчения “В”, мелкого измельчения “С”, тонкого измельчения “D” и выгрузки “Е”.

Вращательное движение вала со стержнями составляет от 100 до 2880 об/мин, а возвратно-поступательное движение колеблется в пределах 30 мм. Мощность двигателя постоянного тока 5 кВт. Число оборотов электродвигателя регулируется при помощи специально сконструированного частотного преобразователя.

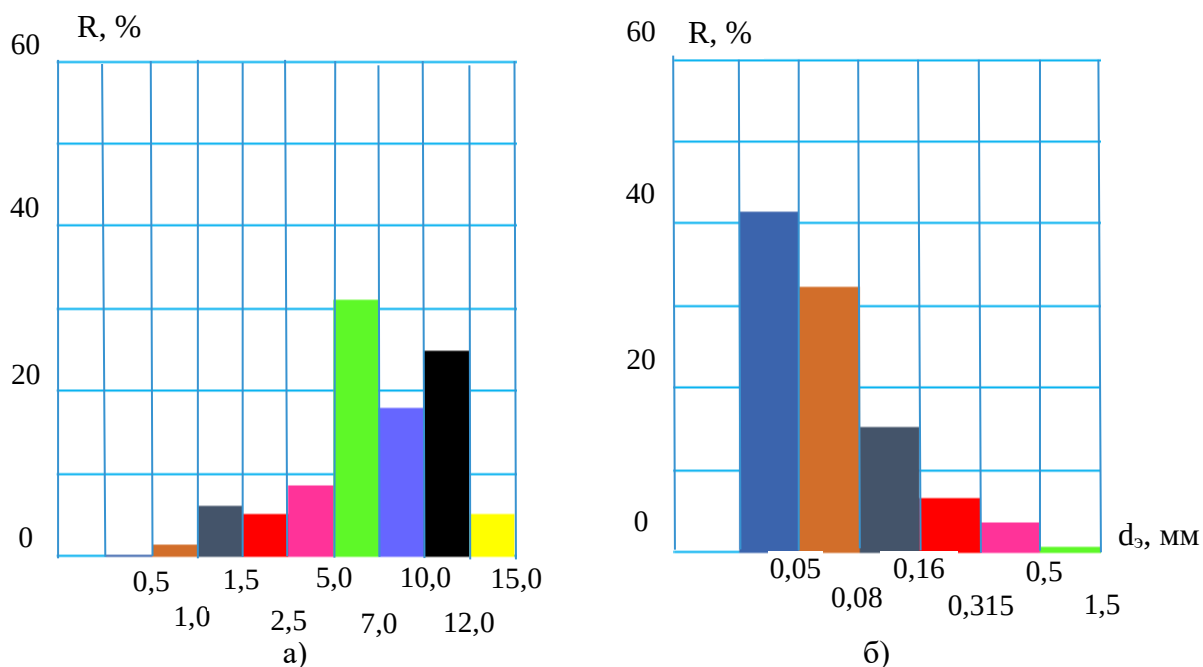
Экспериментальные исследования по тонкому измельчению полидисперсных материалов проведены в скоростном измельчителе турболопастного типа в следующем диапазоне изменения режимных параметров: угловая скорость рабочего вала $\omega=48,1-182,6 \text{ с}^{-1}$ [6].

Исходное сырье, бурый уголь Ангренского месторождения предварительно раскалывали до размера 15 мм.

На рис.1 представлены гистограммы гранулометрического состава бурого угля до (рис.2а) и после измельчения (рис.1б), при угловой скорости рабочего вала турболопастного аппарата $182,6 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

При угловой скорости рабочего вала со стержнями круглого поперечного сечения получены следующие опытные результаты: при величине угловой скорости $\omega=182,6 \text{ с}^{-1}$ фракции до $d_3=0,08 \text{ мм}$ составляет свыше 73,98%, а фракция до $d_3=0,5 \text{ мм}$ свыше 99,4%. Доля фракции с размером частиц до 0,05 мм с 13,18% возросла до 41,57%, т.е. интенсификация процесса измельчения в 3 и более раз.

Как видно, гранулометрический состав кардинально улучшился, причем, если исходное сырьё состояло на 97,3% из фракций 1-15 мм, то после измельчения 97,43% фракций состоят из частиц до 1,5 мм.



а – исходное сырьё; б – $\omega=182,6 \text{ с}^{-1}$.

Рисунок 1 – Фракционный состав измельченного бурого угля в интегральной форме

Общеизвестно, что на разрушение материалов и продуктов доминирующее влияние оказывает возникновение и развитие трещин в результате приложения определенных нагрузок. Концентрация энергии по фронту всегда способствует разрушению материалов и частиц при относительно низких напряжениях, чем это необходимо для разрушения тел с однородной структурой.

В турбулизированном слое происходит многочисленные соударения частиц твердых материалов о стержни и стенку аппарата, что

приводит к возникновению и развитию трещин при высоких нагрузках в турбулентном режиме двухфазного потока, способствуют получению однородных по размерам, близких по форме к шарообразной частиц.

Анализ результатов экспериментальных исследований по измельчению бурого угля в турболопастном измельчителе продемонстрировал, что рост численных значений угловой скорости вращения рабочего вала увеличивает степень измельчения твердых тел, и соответственно, способствует повышению удельной поверхности слоя частиц. Естественно, повышение поверхности частиц слоя ведет к интенсификации технологических (химических или тепло- или массообменных) процессов.

В заключении необходимо подчеркнуть, что для эффективного измельчения бурого угля Ангренского месторождения доказана целесообразность использования много стадийного измельчения в турболопастном аппарате.

Эффективность процесса измельчения бурового угля в 3-х стадийном турболопастном измельчителе объясняется одновременным воздействием трех способов измельчения: раскалывание, стесненный удар и истирание. Доминирующий вклад в интенсификацию процесса измельчения бурового угля в турболопастном аппарате вносит угловая скорость вращения рабочего вала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России в период до 2030 года // “Энергетическая политика”. – М.:ГУ ИЭС, 2010.–184 с.
2. Пряткин В. С., Белов А. А., Иванов В. В. и др. Газификация угля и ее применение в энергетике // “Энергетика”, 2018. – №3. – с.42-47.
3. Ремезов А.В., Ермак В.В. «Подземную газификацию углей» как альтернатива существующим технологиям добычи угля // Геотехнология, 2006. – №7. – с.110-113.
4. Крейнин Е.Г. Подземная газификация углей как один из вариантов экологически чистого энергетического предприятия // Теплоэнергетика.- 1991. – N4. – С.17-37.
5. Аннаев Н. А., Левданский А. Э., Султанов Ж. В., Федарович Е.Г., Нурмухамедов С. Х. К проблеме измельчения бурового угля Ангренского месторождения в турболопастном аппарате / Сб. трудов 1-ой межд. конф. «РАСЕ-2024», Т.: ТХТИ. – с.52-60.
6. Аннаев Н.А., Нурмухамедов Х.С., Усмонов Б.С. и др. Влияние шага размещения стержней на грубое измельчение деформирующихся материалов в турболопастном аппарате // Илмий-техника журнали, ФерПИ, 2019. – №2. – С.115-118.

Т.Э. Ташбаев, асп.; Ф.У. Бекбаева, ассист.;

Н.А. Аннаев, асп. (ТХТИ, г. Ташкент);

С.Х. Нурмухамедов, канд. техн. наук (АО «Махам-Чирчик», г. Чирчик);

Б.С. Усманов, доц., канд. техн. наук (ФерПИ, г. Фергана, Узбекистан)

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГРАНУЛ ФОСФОГИПСА ПРИ ГРАНУЛОВАНИИ В ТУРБУЛИЗИРОВАННОМ СЛОЕ

Химическая промышленность Узбекистана является флагманом в Центрально-азиатском регионе, а среди стран СНГ занимает одно из лидирующих мест и выпускает азотные, фосфорные, калийные, комплексные и другие минеральные удобрения, а также кальцинированную соду. Комплексное развитие предприятий химической промышленности отнесено к приоритетным общегосударственным задачам современного этапа развития экономики [1].

В настоящее время во всем мире промышленные предприятия оказывают значительное антропогенное воздействие на окружающую среду и в связи с этим становится актуальным изыскание оптимальных и экономичных способов очистки промышленных выбросов независимо от их агрегатного состояния.

Твердые отходы, которые трудно обезвредить и очень дорого переработать, складывают в отвалах. К сожалению до сих пор существует наземное складирование твердых отходов - потенциального сырья химической и других отраслей промышленности: галитовых отвалов (~ 500 млн.т), фосфогипса (120 млн. т), огарка (28 млн. т), различных шлаков (~ 500 млн. т) [2, 3].

Особенность данного отхода в том, что содержание мелкодисперсной фракции значительно больше в отличие от других подобных материалов [3]. Одним из перспективных направлений является разработка способа компактирования твердых, сыпучих отходов производства аммофоса. Самым эффективным методом улучшения физико-механических свойств полидисперсных сыпучих материалов является их гранулирование, что обеспечивает хорошую сыпучесть, товарный вид и однородность по размерам, ликвидация пылимости как при транспортировке, так и использовании.

В общем случае гранулирование позволяет существенно уменьшить склонность продукта к слеживанию, а, следовательно, упростить хранение, транспортирование и дозирование; повысить сыпучесть при одновременном устранении пылимости и тем самым улучшить условия труда в сферах производства, обращения и использования. Наряду

с этим гранулирование открывает возможность гомогенизировать смесь в отношении физико-химических свойств; увеличить поверхность теплообмена; регулировать структуру гранул и связанные с ней свойства. Все это способствует интенсификации процессов, в которых используются гранулированные продукты, повышению производительности труда и культуры производства.

В настоящее время из безотходных процессов у нас и за рубежом получили распространение процессы производства минеральных удобрений [4]. В РФ и нашей стране примером безотходной технологии является получение аммофоса по схеме барабанный гранулятор-сушилка с разделением потока экстракционной фосфорной кислоты.

В работе Черепановой М.В. и Лановецкого С.В. представлен процесс гранулирования пылевидной фракции хлористого калия с использованием в качестве связующего реагента раствора лигносульфоната технического [4]. Для грануляции сажи предложено использовать штырьевой полый вал осуществляющий вращательное движение [5].

Для интенсификации гранулирования, повышения производительности аппарата и уменьшение его размеров, а также улучшение гранулометрического состава и товарного вида продукта создан лабораторный стенд для гранулирования окомкованных и сыпучих материалов [6].

Поставленная задача решается за счет того, что цилиндрический корпус из нержавеющей стали X18H10T помимо штуцеров для загрузки исходного материала и выгрузки порошков, имеет штуцер для распыления связующей суспензии. Рабочий полый вал осуществляет не только вращательное, но и возвратно-поступательное движение, что способствует удалению с цилиндрического корпуса налипающей массы. Вал разбит на зоны: загрузки, измельчения исходного материала, гранулирования, уплотнения и выгрузки готовой продукции. Причем, шаг расположения стержней в каждой зоне различен, исходя из задач осуществляемого процесса.

В каждом эксперименте проверялся материальный баланс и установлено, что потери во всем диапазоне изменения режимных параметров не превышали $\pm 0,5\%$.

На рисунке 1 приведен фракционный состав исходного фосфогипса. Анализ распределения частиц по фракциям показал следующие результаты: фракция до 0,1 мм составляет 19,5%, доля фракции 0,1-0,25 мм 24%, фракция в интервале 0,25-0,5 мм составляет 27%, доля 0,5-0,75 мм всего 7,5%, доля фракции 0,75-1,0 мм 9,5%, фракция 1,0-2,0 мм 8,5% и наконец, частицы от 2 до 5 мм составили – 4%.

Гранулирование в турболопастном аппарате в присутствии вяжущей суспензии позволили значительно улучшить основной показатель сыпучих материалов – гранулометрический состав (рис.3.126).

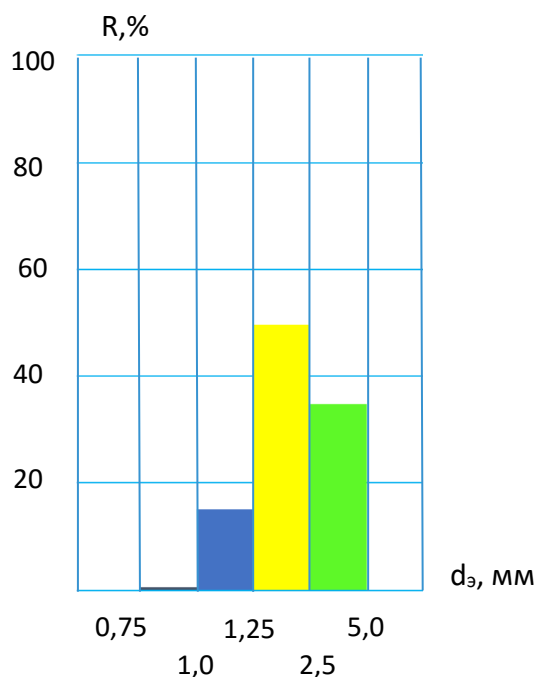


Рисунок 1 – Фракционный состав фосфогипса при гранулировании фосфогипса в турболопастном аппарате

Режимные параметры следующие: исходная влажность фосфогипса 11,4% и суспензия вяжущего вещества, состоящая из 1,5%-ного КМЦ плюс 3% кальцинированной соды, расход суспензии 0,07·G и число оборотов рабочего вала $n=1400$ об/мин. и шаг размещения стержней в зоне грануляции $t/d=1,6$.

Гранулирование в турболопастном аппарате позволили получить гранулы со следующим составом: доля фракции от 0,75 мм до 1,0 мм составил 5,5%, доля фракции 1,0-1,25 мм 15,2%, фракция в интервале 1,25-2,5 мм составляет 49,5%, доля от 2,5 до 5,0 мм - 34,8%. Товарная фракция составила 84,3%.

Полученные гранулы фосфогипса в зависимости от режимных параметров имели влажность в пределах 19-32,5%. После сушки влажных гранул при температурах теплоносителя от 100 до 130°C, опыты по прочности гранул на сжатие представлены на рис.2.

Исследования на приборе ИПР-1М гранул различных диаметров показали, что сушка способствует повышению прочности. С ростом температуры прочность возросла в 1,6-2,1 раза.

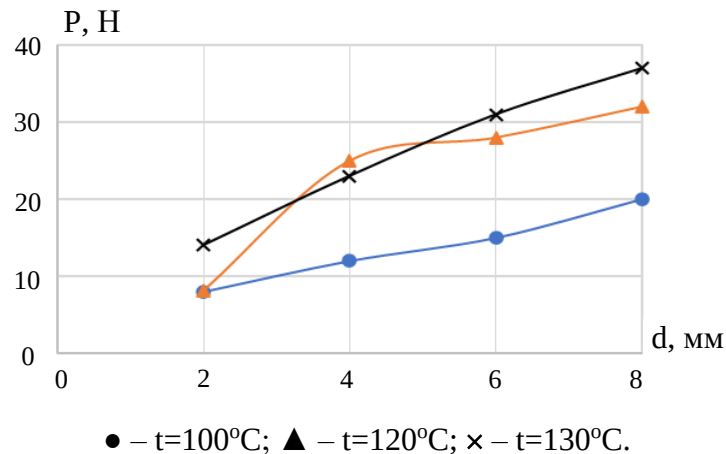


Рисунок 2 – Прочность гранул полученных при гранулировании в турболопастном грануляторе

Получение механически стабильных гранул предлагаемым методом позволяет предотвратить образование комков и глыб при хранении; резко снизить долю пылевидной фракции; резко улучшить экологическую обстановку на предприятии и близлежащих районах; ликвидировать потери сырья и улучшить условия работы для людей

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарчук Т. Химпром шагает в будущее // Экономический вестник Узбекистана, 2009.-№1.- с.79-84.
2. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование – М.: Химия, 1991. - 240 с.
3. Москвичев Ю.А., Павлов О.С. и др. Теоретические основы химических технологий. – СПб. : Лань, 2016. – 272 с.
4. Черепанова М.В., Лановецкий С.В. Оценка параметров гранулирования пылевидной фракции хлорида калия в присутствии добавки лигносульфоната // Изв. ВУЗов «Химия и химическая технология», 2022.– т.65.-вып. №6. – с.88-96.
5. Patent USA №4166722, МКИ⁸ B01J 2/10. Pinned shaft and carbon black pelleter. Bernhard H.Gessler, Paul D.Hann, 1977.– 8p.– 6 fig.
6. Аннаев Н.А., Нурмухамедов С.Х., Султонов Ж.В. и др. Зависимость гранулометрического состав мела при гранулировании в турбулизированном слое // Химическая технология. Контроль и управление, 2023. – №4. – С.11-16.

М.И. Рахмонова, асп.; Э.Т. Мавлонов, PhD, доц.;
Х.С. Нурмухамедов, проф., д-р техн. наук;
Г.Н. Хакимова, доц. канд. техн. наук; А.Б. Нормуминов, магистр
(ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ АБСОРБЦИИ CO₂ РАССОЛОМ В КОЛОННЕ С ЭФФЕКТИВНЫМИ НАСАДКАМИ

Энерго- и ресурсосбережение можно рассматривать как оптимизацию энергетических и материальных потоков существующих технологических процессов для производства продуктов, а более широко – как поиск новых путей рационального использования энергии и сырья для получения тех же, а также новых продуктов. В этой связи особую актуальность приобретает проблема интенсификации технологических процессов, имеющая своей конечной целью сокращение потребляемой энергии на единицу продукции и уменьшение массы и габаритных размеров тепло- и массообменных аппаратов и устройств на основе оптимизации протекающих в них рабочих процессов и их конструкций [1,2].

В настоящее время и в перспективе один из основных вариантов повышения эффективности технологий–модернизация теплообменной аппаратуры путем использования и внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена. Компактные, интенсифицированные теплообменные аппараты улучшают общие характеристики энерго-технологических установок [2].

Продолжительная эксплуатация колонных аппаратов в различных технологиях выявило, что чем ниже эффективность контактных устройств, тем больший расход флегмы, увеличивается количество тарелок или насадки, диаметр и высота аппарата при абсорбции, ректификации, дистилляции, повышается расход греющего пара в кипятильнике колонны и охлаждающего в дефлегматоре [3].

Из-за большой энергоемкости вышеназванных процессов постоянно исследуются способы по влиянию интенсификации тепломассообмена на массогабаритные параметры и снижение энергетических затрат.

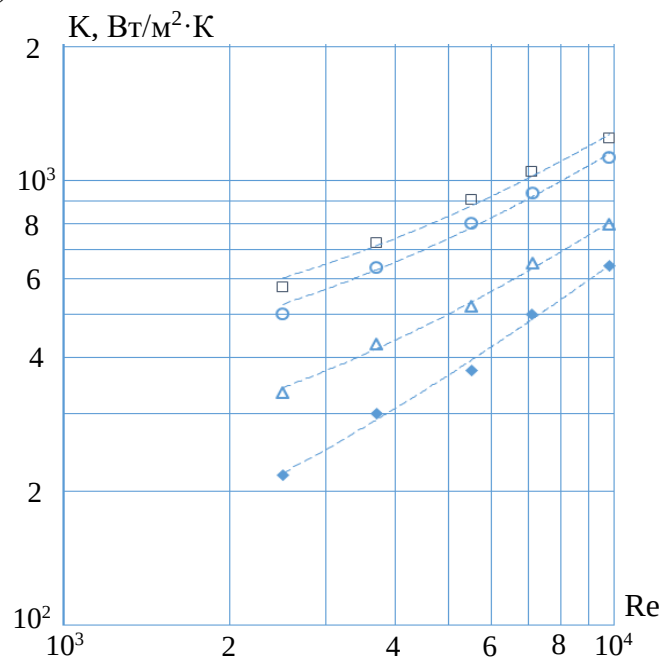
Кроме того, традиционно эффективной считается интенсификация конвективного теплообмена являющееся перспективной в области высоких значений чисел Рейнольдса [4-5]. Однако следует отметить, что в последнее время и переходная область течения жидкостей стала

привлекать исследователей различных направлений промышленности.

Исследования по изучению теплообмена при течении жидкостей проводились на экспериментальной установке, представляющей собой циркуляционный контур [6], состоящий из экспериментального участка – холодильника, емкости для холодного и горячего теплоносителей, насосов, соединительных труб с измерительными средствами расхода, температуры и регулирующими вентилями.

В целях интенсификации теплопередачи при абсорбции проведены исследования по повышению контакта CO_2 с рассолом в межтрубном пространстве пакета труб со спирально-накатанными турбулизаторами. Эксперименты проведены при изменении шага размещения спирально-накатанных труб $t/d=1,14-1,4$, при коридорном их расположении, числах Рейнольдса $\text{Re}=2500-9800$.

При шаге размещения труб на трубной решетке с шагом $t/d=1,14$ и шага размещения труб $h/S=0,095$ при числе Рейнольдса $\text{Re}=2500$ значение коэффициента теплопередачи равно $K=574$, при $\text{Re}=5500$ величина коэффициента $K=903$ и при $\text{Re}=7100$ соответственно – $K=1042$ $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ (рис.1).



◆ – гладкая труба; □ – $h/S=0,095$; ○ – $h/S=0,026$; △ – $h/S=0,009$.

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопередачи K от числа Re при абсорбции CO_2 аммонизированным рассолом.

Зависимость переноса тепла от глубины спиральных канавок снаружи труб и аналогичных выступов внутри труб можно рассмотреть на примере чисел Рейнольдса $\text{Re}=7100$. Так, при этом значении

числа Рейнольдса коэффициент теплопередачи для гладкой трубы $K=501$, численном значении $h/s=0,009$ значение коэффициента равно $K=651$, при $h/s=0,026$ величина равна $K=938$, и наконец, при $h/s=0,095$ величина равна $K=1042$ Вт/м²·К. Из результатов исследований видно, что плавно очерченные спиральные турбулизаторы увеличивают контакт газовой и жидкой снаружи труб, а внутри труб теплоотдачу вследствие снижения до минимума толщину ламинарного вязкого подслоя. Особо следует подчеркнуть эффективность конструктивного воздействия на поток теплоносителя. Естественно, чем удобообтекаема конструкция турбулизатора, тем ниже гидравлическое сопротивление, и соответственно низкие энергетические затраты на прокачку теплоносителя. Общеизвестно, что интенсификация тепло- и массообмена приводит к уменьшению массы, габаритных размеров и повышению её эффективности.

В заключении следует отметить, абсорбционные колонны в производстве кальцинированной соды, как правило состоят из абсорбционных и холодильных зон. Интенсификация теплообмена при отводе теплоты реакции позволит уменьшить долю холодильной зоны и увеличить долю абсорбционной зоны, что естественно приведет к повышению производительности колонны по готовому продукту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбенко Б.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Кутепов А.М. и др. Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике. – М: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2003.-232 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Мякочин А.С. Эффективные теплообменные поверхности. - М: Энергоатомиздат, 1998. – 242 с.
3. Александров Н.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
4. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Энергосбережение в производстве фенола // Вестник КГЭУ. – 2010. – № 3. – С.8-14.
5. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. и др. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. – Казань: изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – 531 с.
6. Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С., Рахманова М.И. и др. Интенсификация теплообмена в холодильной зоне абсорбционных колонн // ИФЖ, 2023.– т. 96. – № 2. – С. 415-421.

УДК 536.246

В.С. Францкевич, зав.кафедрой, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

А.А. Нурыллаева, ассист. (КГУ, г. Нукус);

М.И. Рахмонова, асп; Э.Т. Мавлонов, PhD, доц.;

Х.С. Нурмухамедов, проф., д-р техн. наук (ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан)

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПЕРЕНОС ТЕПЛА В КОЛОННЫХ С НАСАДКАМИ ИЗ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Общеизвестно, что процесс ректификации жидких неоднородных смесей широко применяется не только в химической, но и нефте- и газоперерабатывающих, фармацевтической, пищевой, парфюмерной, криогенной и других технологиях для получения продуктов различного назначения [1].

Из-за значительных энергетических затрат на организацию процесса ректификации жидких смесей постоянно ведутся исследования по поиску способов ректификации с относительно низкими затратами.

Современное состояние проблем энерго- и ресурсосбережения на вышеназванных технологиях выдвигает на первый план вопросы интенсификации процессов и их аппаратное оформление.

В настоящее время предложены разнообразные методы интенсификации конвективного теплообмена. Применительно к течению однофазных теплоносителей используются турбулизаторы потока на поверхности, шероховатые поверхности и поверхности, развитые за счёт оребрения, закрутка потока спиральными ребрами шнековыми устройствами, завихрителями, на входе в канал, подмешивания к потоку жидкости газовых пузырей, а к потоку газа - твёрдых частиц или капель жидкости, вращение или вибрация поверхности теплообмена, пульсации теплоносителя, воздействие на поток электростатических полей, отсос потока из пограничного слоя, струйные системы. Эффективность интенсификации для разных способов при существенно различных затратах энергии различна [2-5].

Анализ состояния вопроса в области создания нового эффективного теплообменного оборудования и модернизация существующего оборудования показал, что требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики течения в межтрубном пространстве пакета труб с двухсторонними турбулизаторами, а также разработки методов для их теплогидравлического расчета.

Исследования по изучению теплообмена при течении жидкостей проводились на экспериментальной установке, представляющей собой циркуляционный контур, работающий в условиях постоянства теплового потока. Основными элементами установки являются экспериментальный участок, холодильник, емкости для холодного и горячего теплоносителей, насосы, соединительные трубы с измерительными средствами расхода, температуры и регулирующими вентилями [6].

В качестве экспериментального участка использовались гладкие и трубы со спиралевидными турбулизаторами меди М1. Геометрические параметры экспериментального участка: длина $l=2000$ мм, диаметр $d=14 \times 1$ мм, шаг навивки спиралевидных турбулизаторов $s/d_{eb}=5,11-14,2$ (s – расстояние между турбулизаторами, мм; d_{eb} – большой диаметр эллипса, мм) и числа Рейнольдса газовой фазы $Re_l=(0,3-2,8) \cdot 10^4$.

В процессе заделке термопар в стенке трубы делали пазов глубиной 0,5 мм и шириной 1,5-2 мм на верхней образующей, на расстоянии 250 мм друг от друга и на расстоянии 100 мм от торцов трубы, и четыре на нижней образующей, на расстоянии 400 мм друг от друга и 500 мм от торцов трубы. В этих отверстиях размещались головки спаев термопар, которые затем герметично заваривались, причем концы термопар проходили внутри трубы и выводились через резиновые уплотнения в торцах трубы.

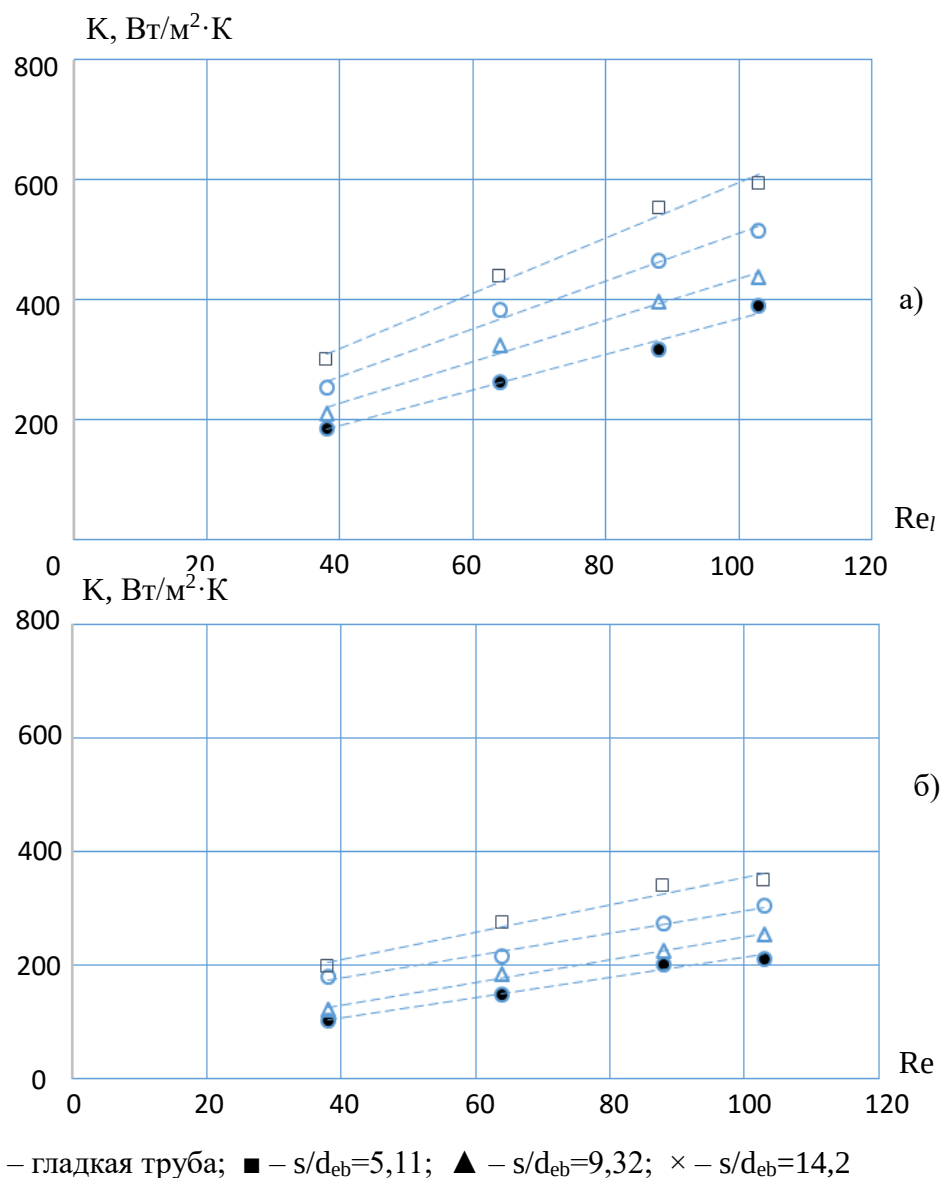
Охлаждаемый агент подавался при помощи насоса, регулировался краном и измерялся измерительной диафрагмой в комплекте с U-образным дифманометром. Охлаждающий агент из бака холодного теплоносителя при помощи насоса через ротаметр подавался в канал трубы. Расход регулировался кранами, его количество определялось ротаметром РС-5, а температура измерялась ртутным термометром как на входе, так и на выходе из трубы. Измерение температуры стенки осуществлялось хромель-копелевыми термопарами диаметром проволоки 0,1 мм, равномерно распределенными и зачеканенными в трубе.

В данной работе представлены результаты исследований по теплопередаче в трубчато-решетчатых насадках из труб со спиралевидными турбулизаторами (рис.1). Из рисунка видно, что зависимость коэффициента теплопередачи K от скорости жидкости Re_l при коридорном размещении труб функция $K=f(Re_l)$ имеет восходящий характер при всех шагах размещения труб в трубной решетке.

Анализ экспериментальных данных показывает значительное влияние шага расположения турбулизаторов $s/d_{э.б.}$ на процесс теплообмена. Шаг расположения труб в трубной решетке $t/d_{э.б.}=1,1$. При ша-

ге расположении спиралевидных турбулизаторов $s/d_{3,6}=14,2$ и $Re_l=64$ величина коэффициента равна $K=325$, при $s/d_{3,6}=9,32$ значение коэффициента $K=383$ и при $s/d_{3,6}=5,11$ – соответственно $K=440$ Вт/м²·К (рис.1а).

Сравнение полученных данных по коэффициенту теплопередачи гладких труб со спиралевидными турбулизаторами показали эффективность исследованной конструкции.



♦ – гладкая труба; ■ – $s/d_{eb}=5,11$; ▲ – $s/d_{eb}=9,32$; × – $s/d_{eb}=14,2$

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопередачи K от скорости жидкости Re_l при шаге размещения труб $t/d_{3,6}=1,1$ (а) и $t/d_{3,6}=1,3$ (б). Коридорное расположение труб

Характер функциональной зависимости $K=f(Re_l)$ при коридорном размещении труб аналогичен коридорному размещению труб на

трубной решетке. Шаг расположения труб в трубной решетке $t/d_{3,6}=1,3$ (рис.1б). При шаге расположения спиралевидных турбулизаторов $s/d_{3,6}=14,2$ и $Re_l=64$ величина коэффициента равна $K=185$, при $s/d_{3,6}=9,32$ значение коэффициента $K=215$ и при $s/d_{3,6}=5,11$ – соответственно $K=285$ Вт/м²·К (рис.1б).

Сравнение экспериментальных результатов по теплопередаче на трубчато-решетчатых насадках из труб со спиралевидными трубами при коридорном расположении труб с различным шагом $t/d_{3,6}$ их размещения показало, что численные величины по коэффициенту теплопередачи K для шага расположения несколько превышает данные полученные для шага расположения.

Из анализа рисунков 1а и 1б выявлено, что при шаге $t/d_{eb}=1,1$ коридорном расположении труб интенсификация теплопередачи относительно шага $t/d_{eb}=1,3$ составляет 1,4-1,7 раза в зависимости от шага навивки спиралевидных турбулизаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юсупбеков Н. Р., Закиров С. Г., Нурмухамедов Х. С. Газларни қайта ишлаш технологияси, жараён ва қурилмалари. – Т.: Шарк, 2015. – 848 с.
2. Дзюбенко Б. В. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / ред. Ю. А. Кузма-Кичта. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2008, – 532 с.
3. Попов И. А., Гортышов Ю. Ф. и др. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / Теплоэнергетика. – 2012, – № 1. – С.3–14.
4. Калинин Э. К. и др. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998, – 408 с.
5. Лаптев А. Г., Фарахов М. И., Минеев Н. Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. – Казань: КГЭУ, 2010. – 574 с.
6. Нуриллаева А. А., Мавланов Э. Т., Нурмухамедов Х. С., Худойбердиева Н. Ш. Интенсификация конвективного теплообмена в трубчато-решетчатых насадках ректификационных колонн // Химическая технология. Контроль и управления, 2024. – №5 – 6. – С. 62-67.

УДК 664.922.7

К.А. Диссанайке, асп.; С.К. Нигмаджанов, доц. канд. техн. наук;
Х.С. Нурмухамедов, проф. д-р техн. наук (ТХТИ; г. Ташкент);
Ш.К. Матчонов, доц. канд. техн. наук (УрГУ, г. Ургенч);
М.С. Самадий, DSc (КГТУ; г. Карши, Узбекистан)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПАРОВОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО МЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

За последние несколько десятилетий мировая мясная промышленность пережила значительный рост, обусловленный ростом населения и ростом потребительского спроса на высококачественные мясные продукты. Однако традиционные методы переработки мяса сталкиваются с многочисленными проблемами, включая ограниченный срок годности, проблемы безопасности пищевых продуктов и воздействие на окружающую среду из-за использования синтетических добавок и консервантов. Кроме того, современные потребители больше заботятся о своем здоровье и требуют более безопасных, натуральных и устойчивых мясных продуктов.

Традиционные методы переработки мяса используются столетия для сохранения и улучшения вкуса мяса. Такие методы являются специфическими для разных регионов и культур и развивались с течением времени [1].

Химические изменения в мясе происходят при применении термической обработки, которая способствует снижению активности воды в мясе, увеличивает срок его хранения и уменьшает количество микроорганизмов, вызывающих порчу. Химические изменения в мясе напрямую влияют на его сенсорные свойства и питательные вещества [2]. В частности, гидролиз, денатурация и образование геля в основном изменяют белки из-за метода нагрева сырого мяса и времени нагрева [3].

В исследованиях многих ученых обсуждаются различные традиционные и современные методы сохранения мяса, охватывающие такие процессы, как сушка, соление, маринование, копчение, заморозка, охлаждение и облучение [4]. В других работах исследуется потенциал включения пробиотиков в ферментированные мясные продукты в качестве средства консервации [5], а также изучается применение новых технологий, таких как обработка под высоким давлением, ультразвук и холодная плазма для консервации мяса [6].

На основе анализа состояния вопроса приготовления мяса и мясных изделий предлагается метод паротермической обработки водяным паром в замкнутом пространстве с последующим резким его сбросом.

Лабораторная установка для проваривания мяса методом мгновенного сброса давления состоит из: цилиндрического корпуса, изготовленного из углеродистой стали Ст.45 диаметром $d=0,219$ м, длиной $l=0,350$ м, которая установлена на опорах, и закреплена при помощи металлических хомутов. Объем рабочей камеры составляет $V=0,020$ м³. Причем, одна сторона цилиндра с плоским дном, а вторая имеет затвор с прокладкой и снабжена специальным устройством для мгновенного сброса давления в рабочей камере. Кроме того, к плоскому дну приварен штуцер для ввода пара, и на нем установлен манометр для контроля давления в рабочем объеме.

Для получения острого пара изготовлен цилиндрический испаритель объемом 0,05 м³, внутри которого смонтирована перегородка для предотвращения уноса конденсата в трубопровод и в рабочую камеру.

Исследования проведены в следующей последовательности: исходный объект переработки (мясо, в частности, баранина) помещалось в рабочую камеру, и в него нагнетался водяной пар из испарителя. По достижению требуемого давления фиксировалось время обработки и по истечению затвор аппарата резко открывался. За мгновение давление пара в рабочей камере сбрасывалось до атмосферного. Сброс давления сопровождается соответствующим хлопком, громкость которой прямо пропорциональна величине давления. Режимные параметры исследований представлены в таблице. В результате паротермической обработки мяса в зависимости от давления, времени выдержки под давлением и времени сброса давления получены положительные результаты.

При давлении водяного пара 0,3 МПа и времени выдержки в течение 100 с с последующим резким сбросом давления получен готовый продукт со светло-коричневым оттенком с красными прожилками, но недостаточно проваренное, средней жесткости мясо.

Увеличение времени выдержки до 150 с при вышеуказанном давлении был получен продукт с мягким хорошим вкусом и с коричневым оттенком.

Дальнейшее увеличение времени выдержки при том же давлении и времени выдержки 200 с получен следующий результат: мясо сильно пропарено, готовое, с темно-кофейным оттенком, однако це-

лостность объекта переработки была нарушена и имеются разрывы между волокнами.

Таблица – Параметры обработки мяса методом мгновенного сброса давления водяного пара

Параметр	Опыт			
	1	2	3	4
Давление, МПа	0,3	0,3	0,3	0,35
Время выдержки, с	100	150	200	200
Время сброса давления, с	0,07	0,07	0,07	0,085

Повышения давления при том же времени выдержки под давлением острого пара такой же результат, как и в предыдущем опыте, однако разрывы между волокнами увеличились и часть волокон оторваны от основного массива куска мяса.

Следует подчеркнуть, что предлагаемый метод мгновенного сброса давления можно успешно использовать для приготовления мяса и мясных продуктов, т.к. пищевая ценность и усвояемость увеличивается в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun X., Sun L., Su L., Wang H. and other. Effects of Microbial Communities on Volatile Profiles and Biogenic Amines in Beef Jerky from Inner Mongolian Districts. *Foods (Basel)*, 11(17), 2022. – p. 1-13.
2. Khalid, W., Maggiolino, A., Kour, J. and other. Dynamic alterations in protein, sensory, chemical, and oxidative properties occurring in meat during thermal and non-thermal processing techniques: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 2023. – p. 1-19.
3. Dissanayake, K., Rifky, M., Jesfar, M. and other. Technology development to measure chemical and oxidative stability of edible oils using Fourier Transform-Infrared spectroscopy. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1275(1), 012007, 2023. – p. 1-6.
4. Nadeem, H. R., Akhtar, S. and other. Heterocyclic Aromatic Amines in Meat: Formation, Isolation, Risk Assessment, and Inhibitory Effect of Plant Extracts. *Foods (Basel)*, 10(7), 1466, 2021. – p. 1-28.
5. Rudy, M., Kucharyk, S., Duma-Kocan, P. and other. Unconventional methods of preserving meat products and their impact on health and the environment. *Sustainability*, 12(15), 5948, 2020. – p. 1-19.
6. Holck, A. L., Axelsson, L., McLeod, A. and other. Health and Safety Considerations of Fermented Sausages. *Journal of Food Quality*, 2017. – p.1 -25.

Е.С. Данильчик, доц., канд. техн. наук;
А.Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук;
Г.С. Маршалова, доц., канд. техн. наук;
Д.В. Островская, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С КРУГЛЫМИ РЕБРАМИ

Работа над проведением экспериментальной части любого исследования требует четкого понимания алгоритма проведения испытаний, а также выверенной системы фиксации полученных данных. Важным этапом модельного исследования является определение критериев подобия и правил моделирования, выбор условий достоверного переноса результатов модельного исследования на натуру. При этом только удовлетворяющий требованиям теории подобия эксперимент обеспечивает надежные результаты, которые могут быть использованы в проектировании и расчетах рабочих теплообменников. Теория подобия устанавливает, что процессы, воспроизводимые в модели, должны быть подобны процессам, происходящим в образце. Для этого необходимо создание геометрического подобия, подобия условий на границах образца и модели, равенство определяющих критериев [1].

Целью работы является экспериментальное исследование физического подобия процессов в теплообменных пучках с вытяжными шахтами для различных чисел труб в поперечном ряду пучка.

В работе [2] представлены методика и результаты экспериментального исследования двухрядного, шахматного, равностороннего пучка из оребренных труб с установленной над ним вытяжной шахтой высотой $H = 0,52$ м и различными крышками с площадью отверстия $f_{\text{отв}} = 0,0087; 0,0147; 0,0201; 0,033; 0,05; 0,069$ и $0,1185$ м². Пучок и собирался из биметаллических оребренных труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21$ и геометрическими параметрами представленными выше. Межтрубный поперечный шаг труб в пучке составлял $S_1 = 70$ мм. Количество труб в поперечном первом ряду – шесть штук, а во втором – пять штук и две необогреваемые полутрубки (рисунок 1, а). Полутрубки устанавливались для обеспечения аэродинамического подобия модели.

Для проведения анализа подобия процессов авторами статьи

были проведены аналогичные исследования для подобного двухрядного пучка с четырьмя трубками в первом ряду и тремя целыми трубами с двумя необогреваемыми полутрубками во втором ряду (рисунок 1, б). Над пучком устанавливалась вытяжная шахта высотой $H = 0,52$ м и различными крышками с площадью отверстия $f_{\text{отв}} = 0,0147; 0,025; 0,033; 0,069; 0,086$ и $0,1185$ м².

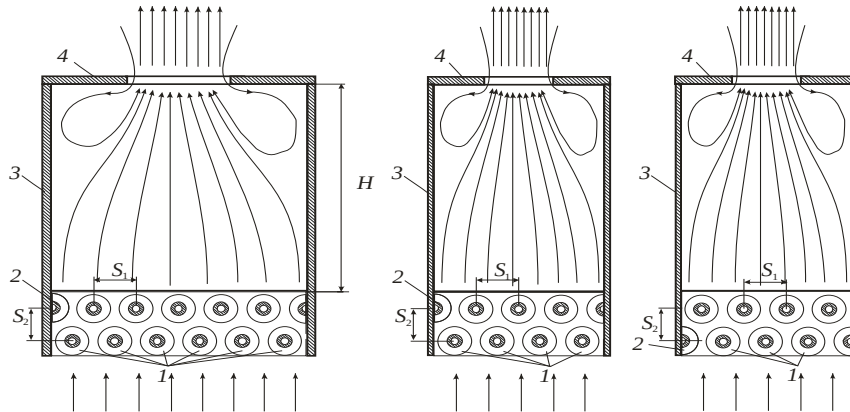


Рисунок 1 – Экспериментальные модели двухрядных пучков труб с шестью а и четырьмя б, в трубами в поперечном ряду (с полутрубками во втором а, б и первом в ряду): 1 – целая обогреваемая труба, 2 – необогреваемая полутрубка, 3 – вытяжная шахта, 4 – крышка с отверстием

Измерительное оборудование и методика экспериментального исследования представлена в работе [2]. Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта от чисел Рейля:

$$Nu = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$Ra = \frac{g \beta d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0)}{\nu a}, \quad (2)$$

где α_k – средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности трубы, Вт/(м²·°С); d_0 – диаметр трубы у основания ребра, м; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); g – ускорение свободного падения, м/с²; $\beta = 1 / (273 + t_0)$ – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; $t_{\text{ст}}$ – средняя температура стенки у основания ребер, °С; t_0 – температуре окружающей среды, °С; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; a – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

Для апробации установки были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели двухрядного пучка в условиях

свободной конвекции без вытяжной шахты. Также были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели однорядного пучка (без необогреваемых полутрубок) с вытяжной шахтой при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{\text{ш}} \approx 0,75$. На рисунке 2 представлены зависимости числа Нуссельта от числа Релея для четырехтрубного и шеститрубного (полученного в [2]) двухрядных и однорядных пучков.

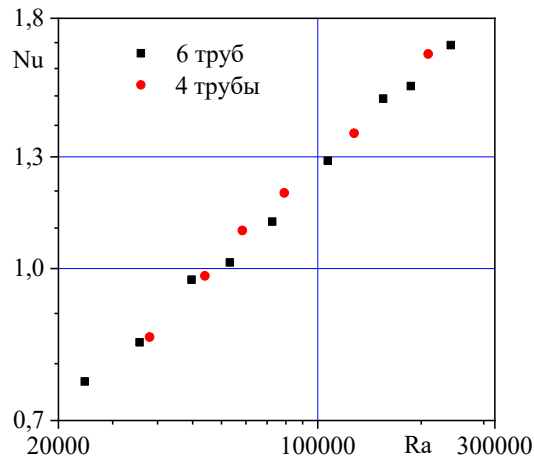


Рисунок 2 – Зависимости числа Нуссельта от числа Релея для шеститрубного и четырехтрубного пучков в условиях свободной конвекции без вытяжной шахты

Как видно, зависимости четырехтрубных и шеститрубных пучков на рисунке 2 *а* и *б* идентичны в пределах погрешности экспериментов и, следовательно, можно утверждать, что соблюдается физическое подобие экспериментов.

Затем были проведены исследования двухрядного четырехтрубного пучка с вытяжной шахтой (рисунок 1, *б*). На рисунке 3 представлены зависимости числа Нуссельта для двухрядных шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахтой при числе Релея $Ra = 10^5$.

Экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью предложенной в [2]:

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \exp \left(- \frac{\chi_{\text{ш}}}{\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} - \chi_{\text{ш}}^0} \right) \left(\frac{\chi_{\text{ш}}^0}{\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}} - 1 \right) \right), \quad (3)$$

где $Nu_0 = 1,278 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ – число Нуссельта без шахты (свободная конвекция); $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}$ – оптимальный коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта максимально ($\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 1,0$ – для четырехтрубного, $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 0,81$ – для шеститрубного пучка); $\chi_{\text{ш}}^0$ – нулевой коэффициент сужения пло-

щади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта равно его значению при свободной конвекции пучка $Nu = Nu_0$ ($\chi_{ш}^0 = 0,182$ – для четырехтрубного, $\chi_{ш}^0 = 0,167$ – для шеститрубного пучка).

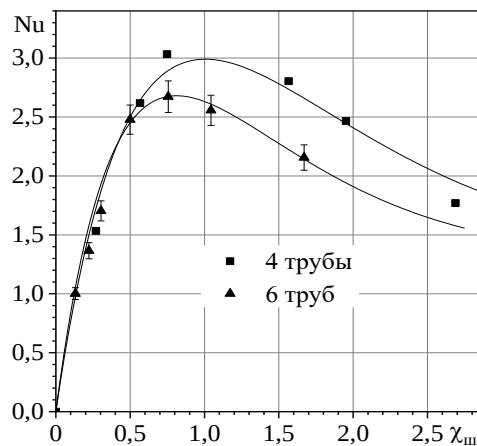


Рисунок 3 – Зависимости числа Нуссельта от коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты для шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахты при числе Релея $Ra = 10^5$

Как видно, четырехтрубный пучок имеет более высокую теплоотдачу (до 20 %) для крышек с коэффициент сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш} > 0,5$. Было выдвинуто предположение, что данный эффект обоснован влиянием необогреваемых крайних трубок во втором поперечном ряду пучка. Недостаточный обогрев потока воздуха по краям пучка приводит к снижению гравитационной силы у стенок шахты и неравномерности вертикальной скорости потока воздуха по сечению пучка. Таким образом, усиливается поток воздуха через центр пучка в месте нахождения трубы-калориметра. На четырехтрубном, более узком пучке этот эффект проявляется более значительно, что и показали данные экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.37, ГБ21-104).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В. К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат. – 1987. – 264 с.
2. Данильчик Е. С. Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Е. С. Данильчик. – Минск, 2022. – 194 с.

В.С. Францкевич, зав. кафедрой, канд. техн. наук;
Р.И. Ланкин, ассист. (БГТУ, г. Минск);
Ш.Б. Махмудов, магистрант
(БГТУ, г. Минск, Узбекистан)

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МАССООБМЕННЫХ РЕШЕТОК В АБСОРБЕРАХ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

Развитие промышленности и увеличение объемов производства приводят к выбросам промышленных газов в атмосферу. Для защиты окружающей среды и утилизации ценных компонентов необходимо эффективно очищать отходящие газы, что требует высокой степени извлечения [1, 2].

Основные процессы, такие как абсорбция и десорбция, активно используют колонны с неупорядоченными элементами насадки, так как они работают в умеренном температурном диапазоне. Важно обратить внимание на насадочные тела с произвольным заполнением, которые характеризуются низким перепадом давления, малым весом и хорошей смачиваемостью, что позволяет уменьшить размеры конструкции и эксплуатационные расходы. За последние 10 лет разница в гидравлическом и массообменном поведении неупорядоченных и структурированных насадок сократилась [3, 4].

Абсорбционные аппараты с подвижной насадкой становятся всё более распространёнными благодаря своей простоте и эффективности [5]. Они могут работать с жидкостями, которые в контакте с газами образуют твердые фракции, избегая засорения традиционных насадок. Подвижная насадка улучшает дисперсию жидкости и распределение газа, что повышает коэффициент полезного действия [6, 7].

Однако такие аппараты имеют недостатки, включая неравномерное распределение газов и образование застойных зон. Мокрая очистка газов считается одним из самых эффективных способов очистки промышленного воздуха. Аппараты мокрого пылеулавливания часто используют подвижные насадки, которые удерживаются в псевдооживленном состоянии газовым потоком, создавая пленку или капли жидкости для очистки. Течение в таких системах остаётся одной из сложных задач газожидкостной механики [5].

В ходе исследования были спроектированы и изготовлены 3 типа опорно-распределительных решеток (рис.1) [1].

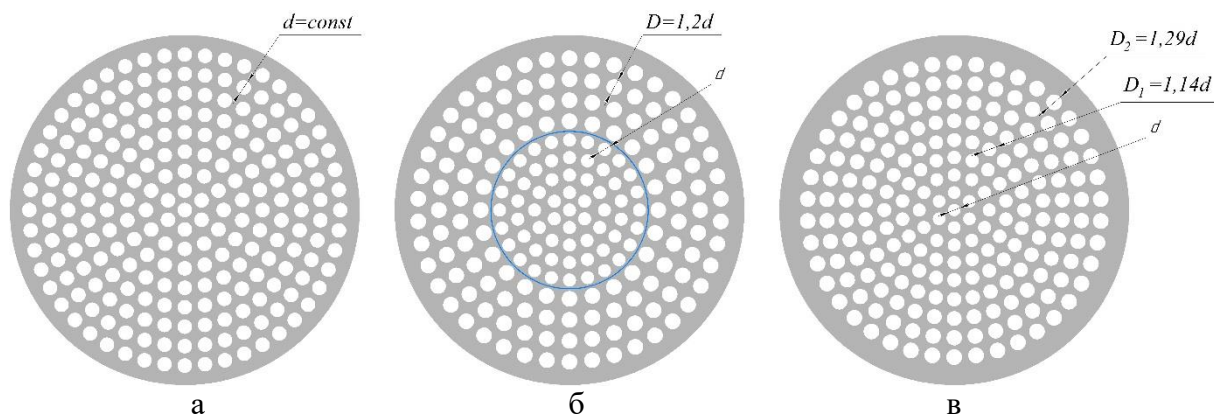


Рисунок 1 – Опорно-распределительные решетки:
 а – тип 1; б – тип 2; в – тип 3

Изготовленные решетки можно классифицировать по их конструкции на несколько типов [1]:

Опорно-распределительная решетка типа 1 (рис. 1, а) представляет собой решетку провального типа. В этой конструкции все отверстия имеют одинаковый диаметр и расположены по концентрическим окружностям. Такой подход обеспечивает равномерное распределение потока через всю площадь решетки, что положительно сказывается на её эффективности.

Опорно-распределительная решетка типа 2 (рис. 1, б) также является решеткой провального типа, но с некоторыми отличиями. В этой конструкции центральные отверстия занимают 20% от общей площади решетки, что позволяет обеспечить более высокую пропускную способность в центре. Отверстия, расположенные на периферии, имеют диаметр на 20% больше и занимают оставшуюся площадь решетки. Они также расположены по концентрическим окружностям, что способствует эффективному распределению потока и минимизации потерь давления.

Опорно-распределительная решетка типа 3 (рис. 1, в) представляет собой решетку провального типа, в которой диаметр отверстий постепенно увеличивается от центра к периферии с постоянным шагом. Это создает градиент пропускной способности и улучшает распределение потока, что особенно важно в системах, где необходимо учитывать изменение давления и скорости потока. Отверстия, как и в предыдущих типах, расположены по концентрическим окружностям, что обеспечивает симметричное распределение нагрузки.

Площади свободного сечения решеток составляли 35% и 45%.

В ходе исследования была проведена серия экспериментальных испытаний, в ходе которых были определены значения гидравличе-

ского сопротивления, характерные для различных типов решеток. Эти измерения позволили получить важные данные о том, как структура решеток влияет на сопротивление потоку газа.

На основе полученных экспериментальных значений были построен график, иллюстрирующий зависимость гидравлического сопротивления (Δp , Па) от скорости газа (ω , м/с) (рис. 2). Этот график наглядно демонстрирует, как изменения в скорости газа влияют на гидравлическое сопротивление в колонне, что имеет ключевое значение для оптимизации процессов, связанных с газообменом и фильтрацией.

Анализ графика позволяет не только выявить тенденции и закономерности в поведении различных типов решеток, но и оценить эффективность их работы в различных условиях. Такие данные могут быть полезны для дальнейших исследований и разработки более эффективных систем, обеспечивающих оптимальное распределение потока и минимизацию потерь давления.

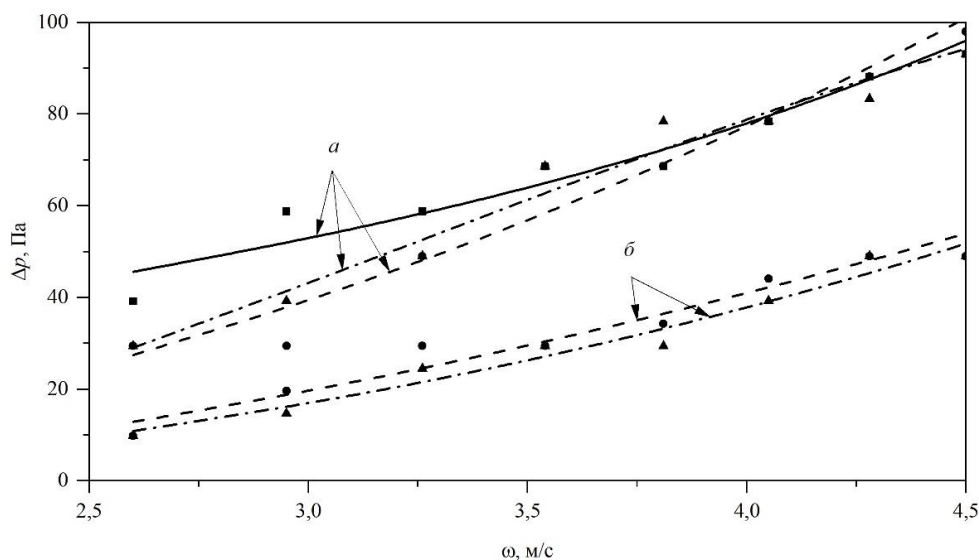


Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления опорно-распределительной решетки от скорости газа:
 —■— тип 1; -◆- тип 2; -▲- тип 3
 Свободное сечение решетки:
 а – 35%; б – 45%

График показывает, что увеличение площади свободного сечения решетки приводит к снижению гидравлического сопротивления. Это наблюдение подтверждает важность конструкции решеток в оптимизации потока газа: чем больше площадь, тем легче газ проходит через решетку, что снижает общее сопротивление системе.

При равенстве свободного сечения гидравлическое сопротивление различных конструкций решеток малого диаметра демонстрирует лишь незначительные различия. Это указывает на то, что при небольших диаметрах конструктивные особенности решеток оказывают минимальное влияние на сопротивление потоку.

Важно отметить, что при скоростях газа до 3,5 м/с гидравлическое сопротивление оказывается ниже у решеток типа 2 и типа 3. Это свидетельствует о высокой эффективности этих конструкций в условиях заданных скоростей, что может быть полезно для оптимизации процессов, требующих низкого сопротивления потоку.

Таким образом, результаты исследования подчеркивают необходимость тщательного выбора конструкции решеток в зависимости от эксплуатационных условий, что способствует повышению общей эффективности и снижению затрат на очистку газов. Данные, полученные в ходе экспериментов, могут служить основой для дальнейших разработок и оптимизации технологий газообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланкин, Р.И., Францкевич В.С. Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2. – С. 108–112. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.
2. Заминян, А.А. Абсорберы с подвижной насадкой / А.А. Заминян., В.М. Рамм. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
3. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой / Труды БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2 (259). – С. 107–114.
4. Maćkowiak, J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems / J. Maćkowiak. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
5. Левш, И.П. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдоожиженным (подвижным) слоем орошаемой насадки / И.П. Левш, А.К. Убайдуллаев. Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
6. Балабеков, О.С. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: монография / О.С. Балабеков, А.А. Волненко. Шимкент: GOLDYES, 2015. – 184 с.
7. Рамм, В.М. Абсорбция газов. 2-е Изд., переработ. и доп. / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

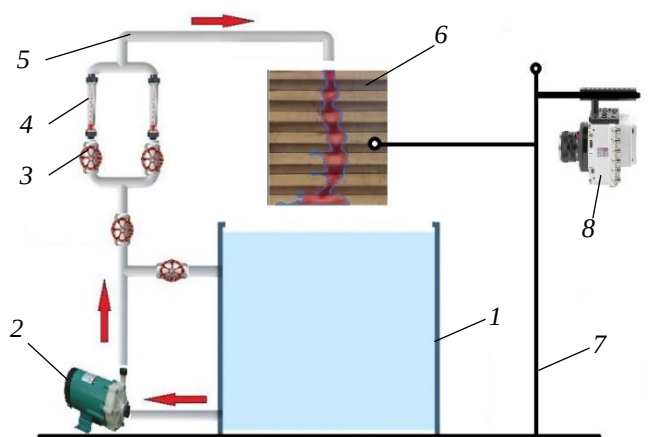
INVESTIGATION OF THE WETTING OF THE SURFACE OF A REGULAR STRUCTURED ELEMENT OF A PACKING

Structured packings are widely used in absorption, distillation, and rectification processes due to their high throughput capacity, efficient mass transfer, and resistance to flooding [1, 2].

Previous experiments on the hydrodynamics and mass transfer of corrugated sheet packings revealed the influence of geometry and operational modes on their performance. Perforation is one optimization method that enhances liquid distribution and surface wetting [3, 4].

We prepared aluminum corrugated sheet samples with corrugation edge lengths of 5, 8, and 11 mm, a corrugation angle of 90°, and dimensions of 100×100 mm. For comparison, three additional sheets with perforation (3 mm diameter holes) were fabricated. The perforations were applied to every second corrugation step, excluding the first, which served as the liquid-distributing surface.

Figure 1 shows the schematic of the experimental setup for studying film flow on the surface of a corrugated sheet.



1 – reservoir; 2 – centrifugal pump; 3 – valve; 4 – rotameter;
 5 – pipeline system; 6 – corrugated sheet; 7 – stand; 8 – camera

Figure 1 – Schematic of the experimental setup

The experimental setup operates as follows: Water from reservoir 1 is pumped by centrifugal pump 2 through the piping system 5 via valve 3, which allows for flow regulation. The water passes through flow meter 4 and is then directed through a nozzle onto the surface of the corrugated

sheet 6. When the film flow regime of the liquid is established, camera 8, mounted on stand 7, is activated.

The experimental investigation of film flow was conducted for a liquid flow rate range Q of 0.01 to 0.054 m³/h. During the experiments, photographs of the established film flow were obtained. Based on the received photographs, the boundaries of film flow were determined. For the wetted surface, the specific value was calculated as a percentage.

The specific value of the wetted surface of the corrugated sheet was determined using formula:

$$a = \frac{S_{wet}}{S_{dry}} \cdot 100\%$$

where S_{dry} , S_{wet} – are the areas of the dry and wetted surfaces on one side of the corrugated sheet, in m² [5].

Based on formula, calculations were performed, and graphical dependencies of the change in the specific value of the wetted surface of the corrugated sheet were constructed as a function of the liquid flow rate.

Figure 2 shows the graphical dependency of the change in the specific value of the wetted surface on the water flow rate for all samples.

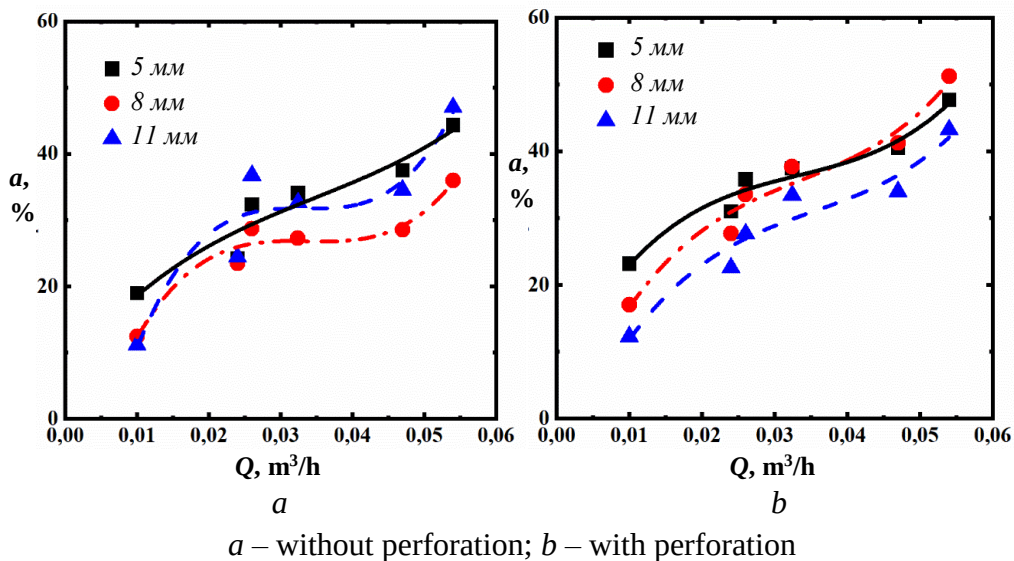


Figure 2 – Change in the specific value of the wetted surface a with respect to the liquid flow rate Q , m³/h for corrugated sheets

Figure 2a shows that wetting of surfaces with different generatrix lengths differs. For sides of 8 and 11 mm, the dependence change is similar, but differs in magnitude. For a generatrix of 5 mm in length, a linear dependence is observed, which is due to a large number of steps forming a corrugation that evenly distribute the water flow. The study of perforated sheets (Figure 2b) showed that the corrugated sheet with a generatrix length of 5 mm has the highest value. The dependences for 5 mm and 8 mm gen-

eratrices converge after a flow rate of 0.03 m³/h and then have identical indicators over the remaining range of flow rate changes. Compared with the dependences for corrugated sheets without perforation, which are shown in Figure 2a, it is clear that perforation allows increasing the specific wetting value mainly for the channel generatrix size of 8 mm. For the other two samples, the dependences do not differ significantly.

Figure 3 shows the graphical dependence of the change in the specific value of the wetted surface on the water consumption on the front and back sides for corrugated sheets with perforation.

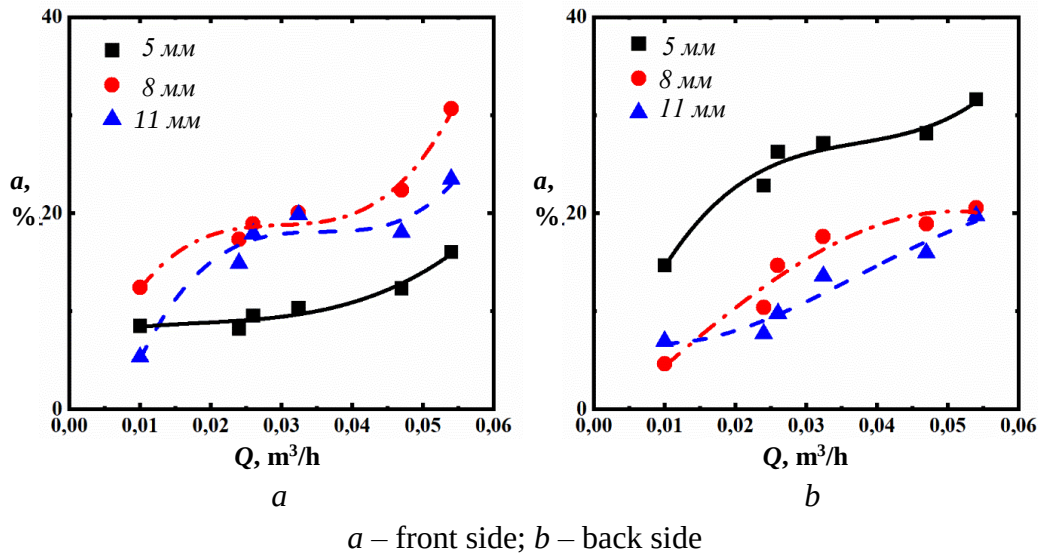


Figure 3 – Change in the specific value of the wetted surface a from the liquid flow rate Q , m³/h for the front and back sides of corrugated sheets with perforation

In Figure 3a it is evident that for the corrugation generatrix size of 5 mm, the wetting of the front side, as noted above in the photographs, is worse, which is associated with a large number of perforated holes and water flowing to the back side. For the other two samples with a generatrix length of 8 and 11 mm, the dependencies are similar. However, for the size of 8 mm, the specific value of the wetted surface is higher over the entire interval. In Figure 3b it is evident that the best wetting on the back side of the corrugated sheets is achieved for the corrugation generatrix size of 5 mm. For the other two samples, the dependencies intersect and do not move significantly away from each other.

Based on the obtained graphical dependencies and the analysis performed, we can summarize that the most preferable for us is the sample with perforation of the corrugated sheet and a generatrix length of 8 mm for further design of the nozzle. Here it became clear that an increase in the holes worsens the wetting of the front surface.

REFERENCE

1. Fair, J. R., & Hwang, S. (2012). Structured Packing for Distilla-

tion and Absorption. Chemical Engineering Progress, 108(4), 36-45. DOI: 10.1021/ef200924j

2. Rase, H. F. (2010). Chemical Reactor Design for Process Plants. New York: Wiley-Interscience.

3. Mytsko, D.Yu., Vaytekovich, P.E. (2020) Gidravlichesкое soprotivlenie regul'yarnykh nasadok massobmennyykh apparatov. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]. No. 8. S. 33–38. (In Russ.)

4. Vaytekovich, P.E., Myt'ko, D.Yu. (2020) Sravnitel'nyy analiz effektivnosti regul'yarnykh nasadok dlya massoobmennyykh apparatov. Trudy BGTU [Proceedings of BGTU]. No. 2. S. 44–49. (In Russ.)

5. Su, Y., & Wang, S. (2015). The Impact of Packing Geometry on Liquid Distribution in Structured Packings. Separation and Purification Technology, 156, 103-111. DOI: 10.1016/j.seppur.201

УДК 697.32

Е.С. Данильчик, доц., канд. техн. наук;

А.Б. Сухоцкий, канд. техн. наук;

С.А. Грива, студ. (БГТУ, г. Минск)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
ДВУХРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ РЕБРИСТЫХ ТРУБ
С РАЗЛИЧНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ ШАГАМИ
ИХ УСТАНОВКИ В ПУЧКЕ**

Использование теплообменников воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции является способом уменьшения или исключением теплообменных процессов с вынужденной конвекцией. Однако существенным недостатком такого режима являются небольшой коэффициент теплопередачи для повышения которого используется оребрение. При этом с целью повышения эффективности процессов теплоотдачи целесообразно проводить оптимизацию геометрических параметров и компоновки пучка, числа рядов.

Целью работы является экспериментальное определение оптимального межтрубного шага горизонтального двухрядного шахматного пучка равносторонней компоновки из труб со спиральными ребрами (коэффициент оребрения $\phi = 21$) в режиме свободной конвекции воздуха. Данная работа является продолжением экспериментальных исследований теплоотдачи горизонтальных шахматных пучков равносторонней компоновки в режиме свободной конвекции [1, 2], где пуч-

ки собирались с числом рядов $z = 1, 2, 4$ при $S_1 = 58; 61, 64$ и 70 мм (относительный шаг $\sigma_1 = S_1 / d = 1,021; 1,09; 1,13; 1,23$). Геометрические параметры биметаллических оребренных труб следующие: $d \times h \times s \times \Delta \times d_0 \times l = 0,0568 \times 0,0152 \times 0,00243 \times 0,00055 \times 0,0264 \times 0,3$ м, $\varphi = 21$ (материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – сталь).

В данной работе на том же измерительном оборудовании и по той же методике [2] представлены экспериментальные исследования шахматных горизонтальных пучков из аналогичных биметаллических труб ($\varphi = 21$) с поперечными шагами $S_1 = 90$ и 120 мм. Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта от чисел Релея (рисунок 1).

Во время экспериментального исследования средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{ст} = 34–180$ °С. Относительная погрешность экспериментальных значений чисел подобия Nu и Ra соответственно составила 3,2 и 4,3 %.

Для сравнительного анализа влияния поперечного шага установки труб в двухрядном оребренном пучке на рисунке 2 представлена зависимость $Nu = f(S_1)$ при $Ra = 100\,000$.

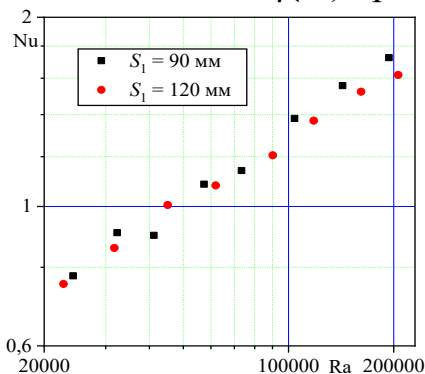


Рисунок 1 – Теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха двухрядного шахматного горизонтального пучка с поперечными шагами установки оребренных труб $S_1 = 90$ мм и $S_1 = 120$ мм

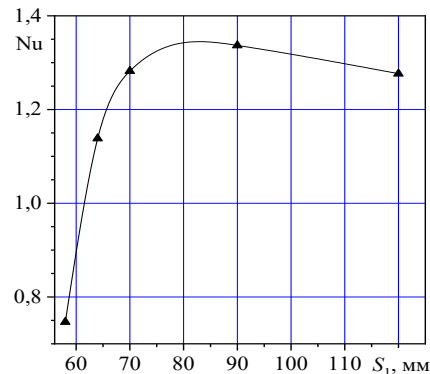


Рисунок 2 – Зависимость теплоотдачи двухрядного горизонтального оребренного пучка от поперечного шага установки труб в режиме свободной конвекции воздуха при $Ra = 100\,000$

Из рисунка 2 видно, что при увеличении межтрубного шага интенсивность теплоотдачи растет и достигает максимума при $S_1 \approx 83–88$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : дис. ... канд. техн.

наук : 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 с.

2. Данильчик Е. С. Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Е. С. Данильчик. – Минск, 2022. – 194 с.

УДК 66.081

Z.A. Otakuziev

(Yangiyer branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology, Узбекистан)

INCREASED DRYING EFFICIENCY

Annotation. Dried fruits and vegetables are always in great demand among the possessor population. Food processing enterprises, schools, kindergartens, canteens, cafes and other catering enterprises usually buy fruit and vegetables drying devices and their practical application of useful information.

Keywords. Drying of vegetables and fruits, Vengerka, injection, steam, product, sterilisation chamber.

Drying vegetables and fruit is a cheap and very sophisticated way of storing them. Such tinned dried fruits are perfectly preserved, cool do not need rooms and do not take up a lot of space to purchase the appropriate equipment for the production of vegetables corresponds. Dryers for fruits and vegetables, providing high-quality drying, produce separate companies. One of them – "Feruza," manufacturers – "Vostok," "Pichuga" which use infrared radiation, people and absolutely harmless to the environment. Such rays penetrate into fruits and vegetables, which is well absorbed by the liquid tissues are not absorbed and thanks to this moisture is in low temperature (40-60°C) is purified. During such processing all the useful substances, vitamins, aroma and even colour are almost completely preserved. The drying time is set according to the product itself, taking into account the ambient temperature.

Dryer for fruits and vegetables "DRY" mainly contains warm air during the processing of medicinal herbs, root crops, fruits, fruit, used for drying mushrooms and quickly leaves the working tank with the help of a fan due to the release of high quality is ensured. Firm "Feruza" industrial drying plant "Nadezhda" with a load of products up to 50 kg semi-industrial drying ovens "Universal," "Universal-2," "Universal-3" and produces a mini-complex for infrared processing of agricultural products. Drying (bleaching, cleaning, washing, cutting, drying, " Natural sciences in the modern world: theoretical and practical scientific, distance, online confer-

ence "Research chopping, packaging, as well as weighing, the cost of this mini-complex several components).

"Elf-2M" for a full cycle of production of dried products You can buy a set of equipment from the company (Ryazan). Characteristics of the following two models can be seen in the table:

You get from Elf-2M only drying module IPKS-064 or Universal drying You can buy a cabinet. Sale of drying cabinet Shs-1 at JSC "Penzmash" You can get. Before starting drying it is necessary to prepare raw materials: sorting, sorting, removal of damaged, unripe and overripe items. Fruits and vegetables are thoroughly washed with running water, inedible parts (stems, peels, peeled from root cultures, etc.) are divided into circles, lines, lines, pieces. Drying raw materials in a solution of salt or citric acid store (5-10 g per 1 litre of water). Vegetables and fruits chopped bleached, laid in a thin layer and dried in special cabinets.

During drying there is a natural weight loss of the products. 1kg yield of dried products from raw materials is given below: each type of vegetable has its own drying technology. For example, ripe beetroot and carrots before drying after 30 minutes of hot water to boil, then cut and dried. Several drying methods exist for apples (depending on the variety). Small pears in sugar syrup (1 litre of water) 150-180 g sugar) can be dried completely, and large pears are dried into several parts.

Wengerka is better dried from plums (you can do anything) intermittently in several stages. Dried to prevent blackening of apricots during drying fumigated for an hour (2 g of sulfur per 1 kg of apricots), then fumigation 70 Dry at a temperature up to ° C. Some fruits and vegetables are immediately known at one temperature dried in cabinets, the rest are pre-dried in the sun and then dried, the rest are first lightly dried in cabinets, then in the sun, then dried again in cabinets at low temperature.

You can sell fruit and vegetables (except your own) to the summer population, rural population, in villages you can buy. Apples, plums, carrots in fruit years, barley is usually very cheap. If possible, buy fruit in southern regions. It is advisable to grow herbs (barley, parsley, celery, etc.) in your farmhouse

Dried fruit is not only good for beriberi in cold season remedies, but also cooked foods, meat dishes and other is a tasty ingredient to add. On your own, in vitrinastore 9 " Natural sciences in the modern world: theoretical and practical scientific, distance, online conference "Research fruit dryer purchased with delivery in the online shop take advantage. Dryers are available in two types.

Convection food dryers:

These are budget devices designed for small catering enterprises. The principle of operation of the device - pre-washed fruits, vegetables and berries lay the equipment on a plate, then connect it to the electrical network. To eat for even drying it is necessary to periodically change plates that when using hot air the working process is carried out evenly distribution. In this case, the products are one of the vitamins loses part, slightly changes their colour and taste. Infrared dryers Here for the processing of products uses infrared rays, which are different have a length and enter the thickness of the fruit, etc. up to 10 mm.

Drying of vegetables, fruit, fruit, mushrooms: Drying receiver for loading raw materials into the processing line for the production of freeze dried products from the hopper we can offer various types of equipment, such as dried vegetables, fruit or mushrooms into a dried bag. Drying vegetables and fruit from the main stream of raw materials long storage and dryness of poor quality agricultural products concentrates – instant soups, cereals, mashed potatoes and dry to be used as a base for the production of other allows the product to be processed.

In the process of technological processing vegetables and fruits lose from 80% to 95% of the original mass, raw depending on the type of material and technological requirements moisture content can be reduced by 90%. In general, the technological parameters of the drying complex of vegetables and fruits scheme is as follows.

Table

Product Name	Humidity, %	Drying time, hour
Grape	35	2-4
Apple	20	1-2
Apricot	30	2-4
Dates	40	4-6
Fig	25	1-2

Drying line for drying vegetables, fruits and mushrooms. Drying line for drying vegetables and fruits, including tomatoes and mushrooms calculated. Working principle of drying chamber: drying injection and gradually increase the moisture content of the product characteristics of the dried product and is a natural process to maintain proper quality. Machine with back inflator and air heating system sections.

This type of drying allows you to achieve for you the same drying that provides an average moisture content on the final product between 70 - 90% reduces to. Steam drying chamber for vegetables 10 " Natural sciences in the modern world: theoretical and practical scientific, remote, online conference on section with temperature from 75 ° C to 135 ° C can be made in the form of a 3-part tunnel in the temperature range. Drying in the

process of which vegetables or fruit on a conveyor belt passing from one part to another, gradually reduces its moisture. Tunnel type steam chamber for drying fruits and vegetables.

Fruit and vegetable drying line options include:

1. Moisture meter sensor
2. Power supply and stabilisation system
3. Sensor cooling system

Depending on the commodity and process requirements we choose chambers of different capacity different drying options, as well as the final product - frozen dried fruit and vegetables packaging machines we can do it. Information is available on request.

Agriculture Dryers for meat, grain, fruit and vegetables, herbs and tea, nuts and mushrooms, fodder, seafood and cheese well. Machines to remove excess moisture, dust and other harmful substances ensures the purification of impurities. High-tech agriculture operation of drying equipment at a sufficient price efficiency, versatility, uniform heating of the product over the entire area.

LITERATURE

1. Ramazonov O, Yusufbekov O. Tuproqshunoslik va dehqonchilik. Toshkent "Sharq", 2003 yil.
2. Ergashev A.E, Rudenko I, Davlatov S. Barqaror taraqqiyot va tabiatshunoslik asoslari. Toshkent. 2016 yil.
3. Karimov I.A. Qishloq xo'jaligi taraqqiyoti - to'kin xayot manbai. T.: O'zbekiston. 1998
4. O'zbekiston Respublikasining "Ferma xo'jaligi to'g'risida"gi qonuni. 1998 yil 30 aprel.
5. O'zbekiston Respublikasining "Qishloq xo'jalik kooperativi (shirkat xo'jaligi) to'g'risida"gi qonuni. 1998 yil 30 aprel.
6. O'zbekiston Respublikasining "Dehqon xo'jaligi to'g'risida"gi qonuni. 1998yil 30 aprel..
7. Yo'ldashev G., Abdurahmonov T. Tuproq kimyosi. (O'quv qo'llanma) T.: 2005 yil.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Энергосбережение в промышленности – это не просто модный тренд, а необходимость, диктуемая экономическими, экологическими и социальными соображениями. Постоянный рост цен на энергоресурсы, ужесточение экологических норм и стремление к повышению конкурентоспособности предприятий делают энергоэффективность одним из приоритетных направлений развития.

Важность энергосбережений показано внизу:

- **Экономия затрат:** снижение энергопотребления напрямую ведет к уменьшению производственных издержек и повышению прибыльности предприятия.
- **Сокращение выбросов:** меньшее потребление энергии означает меньшие выбросы парниковых газов и других вредных веществ, что положительно сказывается на окружающей среде.
- **Повышение конкурентоспособности:** энергоэффективные предприятия становятся более привлекательными для инвесторов и потребителей, которые все больше ценят экологически чистые продукты и услуги.
- **Обеспечение энергетической безопасности:** снижение зависимости от внешних источников энергии повышает устойчивость предприятия к колебаниям цен и политическим изменениям. [1]

Основные направления энергосбережения в промышленности.

Модернизация оборудования: замена устаревшего оборудования на более энергоэффективное позволяет значительно сократить энергопотребление. Например, использование частотных преобразователей для регулирования скорости электродвигателей или применение энергосберегающих ламп.

Оптимизация технологических процессов: анализ технологических процессов позволяет выявить и устранить потери энергии. Это может быть связано с улучшением теплоизоляции оборудования, оптимизацией режимов работы, использованием вторичных энергоресурсов и т.д.

Системы автоматизации и управления: внедрение систем автоматизации и управления позволяет контролировать и оптимизировать энергопотребление в режиме реального времени

Использование возобновляемых источников энергии: солнечные батареи, ветряные установки и другие возобновляемые источники энергии позволяют снизить зависимость от традиционных энергоносителей.

Примеры энергосберегающих технологий

- **Теплоизоляция:** утепление производственных помещений, трубопроводов и оборудования позволяет снизить тепловые потери.

- **Рекуперация тепла:** использование тепла отходящих газов или горячей воды для подогрева других сред.

- **Системы автоматического регулирования:** автоматическое регулирование температуры, давления и других параметров технологических процессов позволяет оптимизировать энергопотребление.

- **Светодиодное освещение:** замена традиционных ламп на светодиодные позволяет значительно снизить потребление электроэнергии при сохранении уровня освещенности.

- **Энергоэффективные двигатели:** использование высокоэффективных электродвигателей с постоянными магнитами позволяет снизить потери энергии. [2]

Экономический эффект от внедрения энергосберегающих технологий.

Внедрение энергосберегающих технологий позволяет предприятиям получить значительный экономический эффект. Срок окупаемости таких инвестиций обычно составляет от нескольких месяцев до нескольких лет. Кроме того, энергосбережение способствует повышению репутации предприятия и созданию положительного имиджа.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение энергосберегающих технологий сталкивается с рядом барьеров:

- **Высокие первоначальные инвестиции:** модернизация оборудования и внедрение новых технологий требуют значительных финансовых затрат.

- **Отсутствие квалифицированных кадров:** необходимость в специалистах, способных разрабатывать и внедрять энергосберегающие проекты.

- **Отсутствие государственной поддержки:** недостаточное финансирование и стимулирование энергосберегающих проектов.

Для преодоления этих барьеров необходимо:

- **Разработка государственных программ поддержки энергосбережения:** предоставление льготных кредитов, налоговых льгот и других мер поддержки.

- **Повышение энергоэффективности зданий и сооружений:** улучшение теплоизоляции, установка энергоэффективных окон и дверей.

- **Развитие рынка энергосервисных компаний:** привлечение частных инвестиций в энергосберегающие проекты.

- **Повышение осведомленности населения и бизнеса:** проведение информационных кампаний и обучение персонала.

Энергосбережение в промышленности – это комплексная задача, требующая совместных усилий государства, бизнеса и общества. Внедрение энергосберегающих технологий не только позволяет снизить затраты и повысить конкурентоспособность предприятий, но и способствует устойчивому развитию экономики и сохранению окружающей среды. [3]

ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов В.П. Энергосбережение: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. Классический учебник, охватывающий широкий спектр вопросов энергосбережения в промышленности.

2. Голубев В. С., Кузнецов И. А. Энергосбережение в промышленности: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. Современное учебное пособие, посвященное актуальным проблемам энергосбережения.

3. Павленко В. А. Энергосбережение в промышленности: учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2018. Подробно рассматривает различные аспекты энергосбережения, включая технические, экономические и организационные.

А.М. Хурмамаев, проф., д-р техн. наук¹,К.Ш. Ахмедова, базовый докторант²,А.А. Худойбергенов, д.ф.т.н. (PhD)³(Институт общей и неорганической химии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан^{1,2};АО "Узбекнефтегаз"³)

СОВРЕМЕННАЯ ДВУХКОЛОННАЯ ДИСТИЛЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА: ОБЗОР

Центральным этапом разделения в каждой нефтеперерабатывающей установке является дистилляция сырой нефти, которая разделяет различные фракции в соответствии с их летучестью. После теплообмена с остатком сырую нефть дополнительно нагревают до около 620 К в печи. Она подается в дистилляционную башню в виде пенообразного потока. Дистилляционная колонна обычно имеет диаметр 4 м и высоту 20–30 м и содержит 15–30 лотков. Очистные колонны, высотой около 3 м и диаметром 1 м, служат для удаления более летучих компонентов из боковых потоков. С помощью этой простой дистилляционной установки не удастся получить удовлетворительный набор продуктов. Рынок требует чистых продуктов (без серы, азота, кислорода, металлов и т. д.), бензина (высокого октанового числа), больше дизельного топлива (высокого цетанового числа), специфических продуктов (ароматических углеводородов, алкенов и т. д.), и меньше низкокачественного топливного масла. Логическими шагами для удовлетворения этих требований являются более сложные дистилляционные и другие физические методы разделения, за которыми следуют химические превращения. Основным ограничением атмосферной дистилляции является тот факт, что углеводороды не должны нагреваться до очень высокой температуры. Причина в том, что выше температуры около 630 К происходят термические разложения. Термические разложения ("термический крекинг" или "пиролиз") крайне нежелательны, поскольку приводят к осаждению углеродистого материала, также называемого коксом, на стенках труб в теплообменниках и печах. На рисунке 1 (3.3) показана типичная современная двухколонная дистилляционная установка, состоящая из атмосферной дистилляционной колонны и колонны, работающей при пониженном давлении (<0,1 бар) для фракционирования атмосферного остатка. Для этой современной дистилляции требуется существенное количество энергии, поэтому оптимальное тепловосстановление является необходимым.

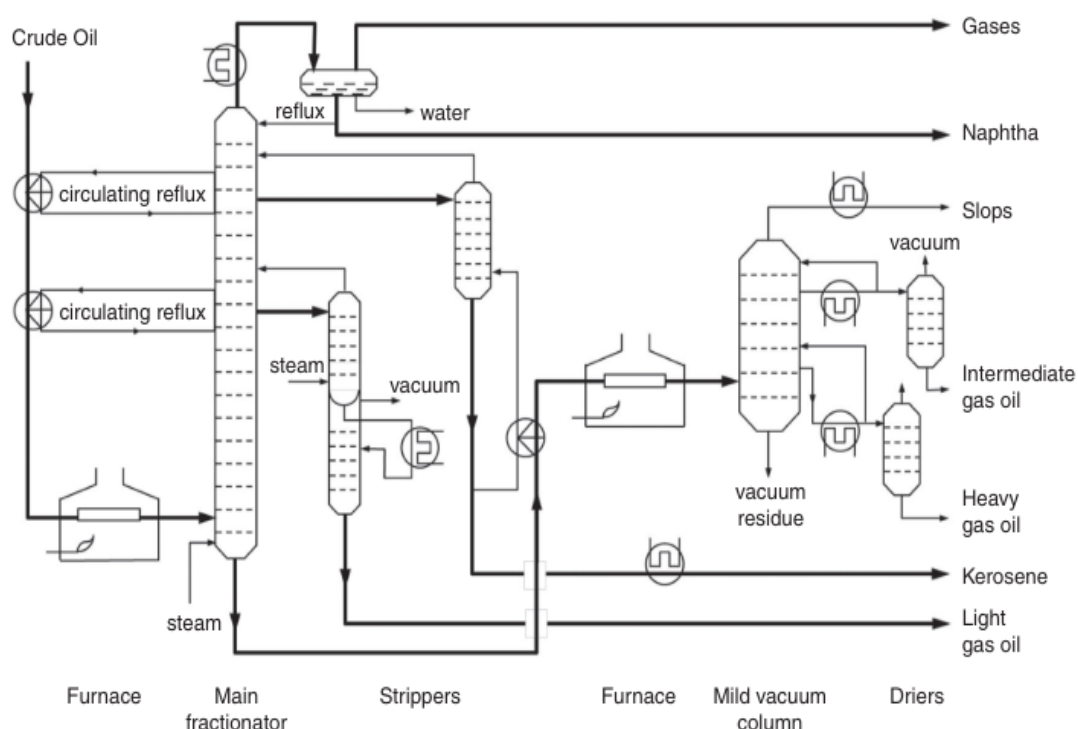


Рисунок 1

Сырье поступает в первую дистиляционную колонну при температуре 570–620 К, в зависимости от сырья и желаемого распределения продуктов. По мере подъема пара вверх по колонне тепло удаляется, и пар частично конденсируется циркулирующими рефлюксными потоками, обеспечивая течение жидкости вниз по колонне. В результате циркулирующие рефлюксные потоки также улучшают состав фракций, которые отбираются в качестве боковых потоков, устанавливая новое равновесие пар–жидкость. Боковой поток легкой газовой нефти очищается паром для извлечения более летучих компонентов. Боковой поток керосина теплообменивается с нижним продуктом колонны. В этом случае пар не используется для очистки, чтобы соответствовать требованиям по содержанию воды для использования керосина в качестве авиационного топлива. Тяжелая жидкая фракция, выходящая из нижней части основной фракционирующей колонны, направляется в колонну слабовакuumной дистиляции для дальнейшего фракционирования. Тепло отводится из вакуумной колонны на различных уровнях путем циркуляции рефлюксных потоков. Остаток из слабовакuumной колонны может быть дополнительно обработан в колонне глубоковакuumной дистиляции для извлечения дополнительных дистиллятов, которые используются в качестве топливного масла или сырья для каталитического крекинга.

Вакуумная колонна обычно имеет гораздо больший диаметр (до 15 м) по сравнению с атмосферной дистиляционной колонной из-за большого объемного расхода в связи с низкими парциальными давлениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steven A., Treese Peter R. Pujado', David S. J. Jones. Handbook of Petroleum Processing. Second Edition. DOI 10.1007/978-3-319-14529-7
2. W.J. Baral, H.C. Huffman, Eighth World Petroleum Congress, Moscow, 4, 119–127 (1971)
3. A.P. Bolton, Zeolite chemistry and catalysis, A.C.S. monograph series no. 117, Washington, DC (1976), p. 714

УДК: 66.063.612

М.А. Промтов, проф., д-р техн. наук;
В.Г. Желудков, асп.
(ТГТУ, г. Тамбов, Россия)

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

Приготовление эмульсий необходимо для получения пищевых, косметических и лекарственных продуктов, лакокрасочных материалов, топливных смесей, а также множества других продуктов, которые являются дисперсными системами. Одним из наиболее важных критических показателей качества эмульсий – средний, максимальные диаметры частиц и их распределение по размерам, которое влияет на другие характеристики, включая реологические свойства, внешний вид, стабильность и так далее. Как правило, эмульсии подразделяются на три категории: макроэмульсии (размер капель 1-100 мкм), наноэмульсии (размер капель 100-1000 нм) и микроэмульсии (размер капель 1-100 нм).

Для получения стабильных тонкодисперсных эмульсий широко применяется оборудование с вращающимися рабочими элементами: быстроходные мешалки, коллоидные мельницы, роторно-пульсационные и роторные импульсные аппараты. Роторные импульсные аппараты (РИА) характеризуются высокой производительностью, невысокими удельными энергозатратами и высоким качеством обрабатываемых эмульсионных систем [1, 2].

Для маловязких эмульсий максимальный стабильный размер капель $d_{\max}$ предлагается рассчитывать по формуле [2]:

$$d_{\max} = k \cdot (\sigma/\rho)^{0.6} \cdot \varepsilon_{\max}^{-0.4}, \quad (1)$$

где k – эмпирический коэффициент, σ – коэффициент межфазного натяжения, Н/м; ρ – плотность сплошной фазы, кг/м³; $\varepsilon_{\max}$ – максимальная удельная энергия, диссипируемая в обрабатываемой жидкости, Вт/кг.

Максимальный стабильный размер капель не будет достигнут до тех пор, пока все капли дисперсной фазы не окажутся в области потока с наибольшей энергией. Следовательно, максимальный стабильный размер капель определяется наибольшей скоростью рассеивания энергии [2]. Исходя из этого положения в уравнении (1) используется параметр $\varepsilon_{\max}$. Кроме того, для достижения равновесия потребуется большое количество проходов через активную турбулентную зону или последовательное многократное прохождение капель эмульсии через несколько зон обработки потока эмульсии в турбулентном режиме [3].

Для геометрически аналогичных турбулентных систем $\varepsilon_{\max}$ рассматривается как среднее значение, и этот параметр может быть определен потребляемой мощностью отнесенной к единице массы эмульсии (N/m).

Для определения влияния удельных затрат мощности на размер капель слабоконцентрированной и маловязкой эмульсии были проведены экспериментальные исследования по эмульгированию подсолнечного масла в дистиллированной воде при обработке в РИА. Методика проведения экспериментов и описание установки опубликовано в работе [3]. Соотношения воды и масла в эмульсии принималось 9:1. Эмульгирование проводили без добавления эмульгатора. Эмульсию обрабатывали четырехкратно при подаче в РИА равной 100 л/м и давлении на входе 0,28 МПа. Частота вращения электродвигателя РИА регулировалась частотным преобразователем ESQ-600-4T0075G/0110P, который показывал частоту и силу тока.

Удельная мощность, диссипируемая в массе эмульсии, определяется потребляемой мощностью РИА N_1 , затрачиваемой на вращение ротора, и потребляемой мощностью насоса N_2 , затрачиваемой внешним насосом на подачу эмульсии в РИА за время обработки:

$$\varepsilon = N/m = (N_1 + N_2)/m, \quad (2)$$

где ε – удельная мощность, Вт/кг; N – общая потребляемая мощность, Вт; m – масса эмульсии в установке, кг; N_1 и N_2 – мощность, потребляемая РИА и насосом, Вт.

В качестве потребляемой мощности РИА примем мощность электродвигателя на валу. Мощность электродвигателей РИА и насоса рассчитывается по формуле:

$$N_1 = 1,73 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot (\eta/100), \quad (3)$$

где I – сила тока, А; $U=380$ В – напряжение сети; $\cos \varphi=0.88$; $\eta=87$ – к.п.д электродвигателя, %. При увеличении частоты вращения ротора увеличивалась сила тока и потребляемая мощность РИА.

Мощность, потребляемая насосом, практически не зависит от частоты вращения ротора РИА n (об/с). Расчетную мощность насоса можно рассчитать как $N_2=P \cdot Q$, где P – давление, создаваемое насосом, Па; Q – поток жидкости, м³/с. При давлении $P=0,2$ МПа и $Q=10^{-4}$ м³/с, $N_2=20$ Вт.

Таким образом, удельная мощность, диссипируемая в эмульсии, зависела только от величины частоты вращения ротора и количества проходов через РИА. Масса обрабатываемой эмульсии в установке с РИА составляла 10 кг, Величину поверхностного натяжения на границе фаз масла принимали $\sigma \approx 25 \cdot 10^{-6}$ н/м [4]. Графики зависимости потребляемой мощности РИА от частоты вращения ротора n , показаны на рис. 2. При заданной угловой скорости вращения ротора эмульсия совершала 4 прохода через РИА и затем сливалась из установки. Определение размеров частиц эмульсии проводилось на приборе «Анализатор размеров частиц и дзета-потенциалов NICOMP-380ZLS». Результаты экспериментальных исследований по определению среднего диаметра частиц эмульсии от частоты вращения ротора РИА представлены на рис. 3.

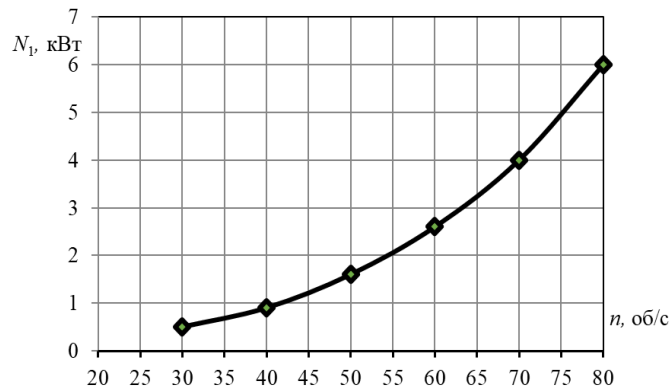
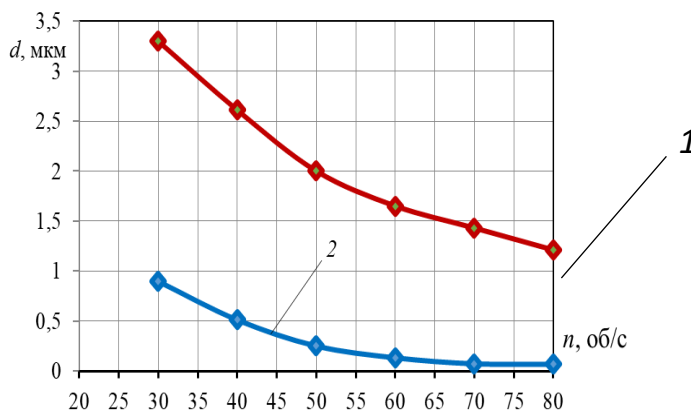


Рисунок 2 – Зависимость потребляемой мощности от частоты вращения ротора РИА

Расчетный диаметр частиц эмульсии определяли по формуле (1). Необходимо отметить, что по формуле (1) определялся максимальный диаметр частиц, а прибор дает расчет среднего диаметра частиц. Как видно из графиков на рис. 3, характер изменения зависимости расчетного диаметра частиц эмульсии d от частоты вращения ротора РИА и, соответственно от величины диссипируемой мощности, идентичен зависимости среднего размера частиц эмульсии, измеренного по пробам эмульсии, обработанной в РИА. Эмпирический коэф-

коэффициент $k \approx 0,1$. Величина эмпирического коэффициента установлена для исследуемой эмульсии и конкретных условий ее обработки. Для точного расчета размера частиц по формуле (1) необходимо учесть всю энергию, которая может быть введена в обрабатываемую эмульсию, что не всегда возможно, так как часть энергии при работе РИА и насоса тратится на механические потери, нагрев жидкости и потери тепла и т.п.



1 – расчетные данные для максимального диаметра;
2 – экспериментальные данные среднего диаметра

Рисунок 3 – Графики зависимости размера частиц эмульсии d от частоты вращения ротора РИА

ЛИТЕРАТУРА

1. Urban, K.; Wagner, G.; Schaffner, D.; Röglin, D.; Ulrich, J. Rotor-Stator and Disc Systems for Emulsification Processes. Chem. Eng. Technol. 2006, Vol. 29, №1. – P. 24-31.
2. Leng, D. E. Immiscible liquid-liquid systems / D. E. Leng, R.V. Calabrese // Paul, E. L. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice / E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004. – Ch. 12. – P. 639-753.
3. Промтов М.А. Влияние кратности обработки эмульсии в роторном импульсном аппарате на предельный размер частиц / М.А. Промтов, В.Г. Желудков // Химическая технология и техника: материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск: БГТУ, 2024. – С. 206-209.
4. Зимон, А.Д. Коллоидная химия: Учебник для вузов. – 3-е изд., доп. и исправл. – М: Агар, 2003 – 320 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ К ПРОЦЕССУ КОМПАКТИРОВАНИЯ

Как показывает опыт работы отечественных калийных предприятий и результаты многочисленных исследований, невозможно добиться хороших физико-механических и физико-химических свойств гранулированного хлористого калия, получаемого методом компактирования в валковых прессах, только за счет оптимального режима прессования и реагентной обработки гранул [1; 2; 3]. Разрушение гранул хлористого калия, потеря ими сыпучести является сложным термодинамическим процессом, обусловленным, в том числе, несовершенной структурой дисперсных частиц материала, которым, вместе с тем, можно придать равновесную структуру в результате их принудительного уплотнения и агломерации под внешним механическим воздействием в специальных аппаратах – смесителях-агломераторах, обеспечивающих тесное контактное высокоэнергетическое взаимодействие частиц хлористого калия [4]. При этом процесс совершенствования кристаллической структуры хлористого калия рекомендуется проводить в присутствии структурообразующих модификаторов, что способствует получению наиболее влагостойкого продукта с улучшенными реологическими свойствами.

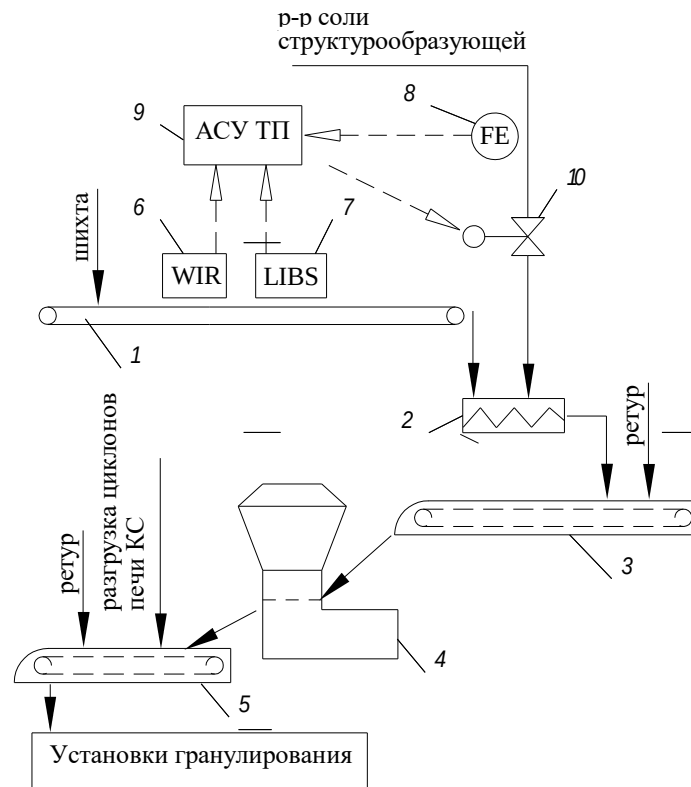
В условиях отделений грануляции обогатительных фабрик ОАО «Беларуськалий» с флотационным способом обогащения, описанный выше процесс структурного совершенствования частиц шихты хлористого калия, осуществляется в смесителях-агломераторах на стадии подготовки шихты к компактированию перед ее сушкой. В этих аппаратах происходит гомогенизация шихты по грансоставу и влажности, а также механоактивация частичек хлористого калия с предварительной структурной агломерацией путем пластической деформации увлажненной смеси. Процесс осуществляется с добавлением структурообразующей соли, выбор которой определяется как ее физико-химическими характеристиками, так и технико-экономическими. Реализуемое в настоящее время технологическое решение предусматривает использование в качестве структурообразующей соли кальцинированную соду (Na_2CO_3) в виде 15 % водного раствора, трансформирующую содержащиеся в шихте хлориды кальция и магния в мало-растворимые и менее гигроскопичные соединения, а именно: хлорид кальция превращается в карбонат кальция, а хлорид магния – в основ-

ные карбонаты магния различного состава. Водный раствор структурообразующей соли, дозируется пропорционально количеству подаваемого в смесители-агломераторы продукта в соответствии с утвержденными на фабрике нормами расхода. При этом установлено, что наибольший гидрофобизирующий эффект в готовом продукте наблюдается при удельных расходах структурообразующего модификатора, соответствующих стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния [5].

В процессе исследования состава исходного питания установок гранулирования было установлено, что содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в шихте является крайне нестабильной величиной и колеблется в широком диапазоне. Так замеры в условиях флотационных фабрик в течение 3-х месяцев показали, что содержание ионов Ca^{2+} изменялось в пределах от 0,020 до 0,29 мас. %. Максимально высокий показатель содержания ионов $\text{Ca}^{2+} = 0,29$ мас. % был зафиксирован однократно в шихте СОФ-3. При этом, как правило, среднее содержание ионов Ca^{2+} не превышает 0,08 мас. %. За этот же 3-х месячный период показатели содержания ионов Mg^{2+} в шихте изменялись в пределах от 0,020 до 0,075 мас. %.

Соответственно, в условиях выявленных колебаний содержания в шихте ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , для поддержания оптимального расхода структурообразующего модификатора, соответствующего стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния, расход кальцинированной соды должен был меняться в пределах 1–3 кг/т, при том, что ее фактически расход составлял в течение всего времени исследования постоянную величину – около 2 кг/т в соответствии с утвержденными на производстве нормами. Следовательно, количество подаваемого в процесс модификатора далеко не всегда соответствовало научно-обоснованным нормам.

Таким образом, существенным недостатком технологического процесса агломерирования шихты хлористого калия на этапе ее подготовки к процессу компактирования на всех без исключения флотационных фабриках, является несоответствие дозировки структурообразующего модификатора в смесители-агломераторы стехиометрии по отношению к хлоридам кальция и магния, что негативно сказывается на физико-механических свойствах готовых гранул. Для устранения выявленного недостатка была разработана модернизированная технологическая схема подготовки шихты к компактированию, свободная от указанного недостатка, сущность которой поясняется рисунком.



- 1 – конвейер ленточный подачи исходной шихты; 2 – смеситель-агломератор;
 3 – конвейер скребковый; 4 – сушильная установка кипящего слоя (КС);
 5 – конвейер скребковый; 6 – весы радиометрические; 7 – поточный лазерный оптико-
 эмиссионный анализатор; 8 – расходомер; 9 – управляющий блок АСУ ТП;
 10 – кран регулирующий с электроприводом

Рисунок – Технологическая схема подготовки шихты к компактированию

Технологическая схема предусматривает установку на конвейере 1, подающем исходную шихту в отделение грануляции, поточных радиометрических весов 6 и поточного лазерного оптико-эмиссионного анализатора 7, например, анализатора химического состава минеральных веществ МАУА фирмы Lyncis [6], технические характеристики которого позволяют одновременно определять содержание хлоридов кальция и магния в шихте в режиме реального времени.

Технологический процесс осуществляется следующим образом. В процессе подачи шихты хлористого калия в смеситель-агломератор 2 показатели, считываемые весами 6, анализатором 7 и, установленным на трубопроводе подачи раствора структурообразующего модификатора расходомером 8, поступают в управляющий блок АСУ ТП 9, в котором производится обработка данных о количестве шихты, содержании в ней хлоридов кальция и магния, расходе модификатора. По результатам обработки данных управляющий сигнал поступает на исполнительный механизм крана 10, обеспечивая подачу раствора мо-

диффикатора в смеситель-агломератор 2 в количестве, соответствующем стехиометрии по отношению к упомянутым выше хлоридам кальция и магния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Букша, Ю. В. Проблемы стабилизации качества хлористого калия / Ю. В. Букша, З. Л. Козел, М. Д. Рогозин // Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей : сб. науч. тр. : в 2 т. / под ред. Ю. В. Букши. – СПб. : Информ.-издат. агенство «ЛИК», 2001. – Т. 2: Переработка природных солей. – С. 7–11.

2. Дихтиевская, Л. В. Неорганические модификаторы регулирования физико-химических и механических свойств дисперсий калийных удобрений / Л. В. Дихтиевская, В. В. Шевчук // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, Вып. 9. – С. 1227–1232.

3. Дихтиевская, Л. В. Разработка технологии получения гранулированных калийных удобрений с улучшенными физико-химическими и механическими свойствами / Л. В. Дихтиевская, В. В. Шевчук, Н. П. Крутько // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2010. – Т. 54, №. 6. – С. 57–61.

4. Андреева, Н. К. Повышение качества калийных удобрений на основе улучшения физико-химических свойств исходного продукта / Н. К. Андреева // Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 76-79.

5. Разработка технологий кондиционирования мелкодисперсного и гранулированного хлорида калия / В. В. Шевчук [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. Хімічных навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 288–298.

6. Online Elemental Analyzer MAYA // Lyncis.lt – URL: <https://www.lyncis.lt/online-elemental-analyzer> (дата обращения: 03.12.2024).

УДК 620.9

А.Ю. Смирнов, студ.;

С. Н. Гладких, доц., канд. техн. наук

(НовГУ имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Россия)

ТЕКУЩИЙ УРОВЕНЬ И ВЕКТОРЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Современный уровень развития научно-технического прогресса требует всё больше и больше энергетических ресурсов и, в частности,

электроэнергии. На данный момент подавляющая её часть вырабатывается на электростанциях традиционных типов. К ним относятся:

- Тепловые электростанции (ТЭС), которые работают на энергии сжигаемого топлива (уголь, газ, мазут);
- Гидроэлектростанции (ГЭС), использующие для выработки электроэнергии энергию потока воды;
- Атомные электростанции (АЭС), использующие энергию деления ядер тяжёлых элементов.

Однако, невозможно бесконечно долго наращивать генерацию электроэнергии с помощью электростанций этих типов. Сжигание топлива на ТЭС оказывает отрицательно влияние на экологию планеты [1]. Крупные ГЭС построены в большинстве пригодных для этого мест и остаётся только заниматься их дальнейшей модернизацией или же строительством малых ГЭС [2] (но это не даст достаточного прироста генерации). Границы использования АЭС уже тоже начинают просматриваться и связаны они с конечностью необходимого для них топлива на планете. Для решения этой проблемы разрабатываются и уже начинают эксплуатироваться реакторы на быстрых нейтронах [3], но и они не смогут полностью заменить имеющуюся генерацию.

В этих условиях получают свою возможность для развития альтернативные источники электроэнергии. Они бывают разных видов, но основных два, а именно солнечные и ветряные электростанции. В данной работе будут рассмотрены солнечные электростанции (СЭС).

Целью данной работы является рассмотрение текущего уровня развития солнечной электрогенерации, а также её дальнейших перспектив.

Задача исследования состоит в изучении основных типов солнечных электростанций, их сравнении и определении возможности их использования в России.

Электроэнергия на СЭС может вырабатываться двумя разными способами:

1. *Фотоэлектрический*. При таком способе генерации происходит прямое преобразование энергии солнечного света в электрическую энергию [4]. Это возможно благодаря явлению фотоэффекта, когда свет, попадая на фотоэлемент, выбивает из него электроны и они двигаются по проводнику, то есть создают электрический ток. Типовая солнечная панель, выпускаемая промышленностью представлена на рис. 1. Выпускаются панели различных типов. Основными являются панели на основе кремния, которые в свою очередь подразделяются на монокристаллические, поликристаллические, а также панели на ос-

нове аморфного кремния. Существуют и бескремниевые панели. Это в первую очередь устройства на основе редкоземельных металлов, а также полимерные и органические панели.



Рисунок 1 – Солнечная панель

Современные панели имеют КПД до 25% (для монокристаллических устройств) и срок службы до 25 лет. Им не страшны низкие температуры, что с одной стороны делает возможным их применение в условиях Крайнего Севера. Но, с другой стороны, недопустимо, чтобы панель была покрыта снегом даже частично (это резко снизит её КПД), поэтому потребуется постоянная очистка массива батарей СЭС.

Недостатком такого типа СЭС является то, что панели вырабатывают постоянное напряжение, причём только в светлое время суток. Следовательно, необходимы устройства, которые будут преобразовывать постоянное напряжение в переменное (инверторы) и запасать энергию для работы электростанции в тёмное время суток (аккумуляторы).

2. *С помощью гелиоконцентратора (Рис.2).* В таком типе электростанций [5] солнечный свет падает на большое количество зеркал, которые отражают его на приёмник, находящийся в центральной башне. В приёмнике находится теплоноситель (в простейшем случае вода), который при нагревании превращается в пар и выработка электроэнергии происходит как на обычной тепловой электростанции. Пар вращает турбину соединённую с генератором, который вырабатывает электроэнергию.



Рисунок 2 – СЭС с гелиоконцентратором

Возможен также вариант исполнения такой СЭС не башенным типом, а с помощью нагревания трубок с теплоносителем непосредственно перед зеркалом. Последнее в таком случае выполняется особой формы (цилиндрической и др.). Принцип действия при этом остаётся таким же.

КПД таких электростанций может достигать в идеале 30%. В отличие от фотоэлектрического типа СЭС есть возможность получать горячую воду непосредственно из системы без дополнительных преобразований энергии.

Однако, такие электростанции можно устанавливать только в очень жарких местах планеты (как можно ближе к экватору), ведь только там они смогут работать с максимально возможным КПД. В России установка таких электростанций возможна только в самых южных регионах. Недостатком является необходимость постоянной очистки зеркал от пыли, а также необходимость наличия теплоносителя.

На современном этапе развития научно-технического прогресса достигнуты хорошие результаты в разработке эффективных источников электроэнергии с помощью солнечного света. Наиболее перспективными при этом считаются фотоэлектрические источники [6,7]. Развитие электроники позволяет изготавливать такие панели с более высокой точностью и, как следствие, более высоким КПД. Благодаря этому становится возможным их использование в объектах электрогенерации. При этом СЭС являются экологичной альтернативой традиционным источникам энергии, но на данный момент они могут только дополнить их, а не заменить полностью.

Выводы. Благодаря своим размерам Россия имеет разнообразные климатические условия, которые делают возможным использование СЭС различных типов на её территории. При этом следует учитывать погодные условия и подбирать оптимальные варианты использования альтернативных источников энергии. В этой работе рассмотрены только солнечные электростанции, но не следует забывать и про другие источники, а также про возможности их совместной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хакимуллин Б. Р., Гумеров И. Р., Зайнуллин Р. Р. Экологические проблемы современных тепловых электростанций // Теория и практика современной науки. 2017. №3 (21). С.785-788.
2. Егоров А. О., Пичугова О. А. Исследование структуры и степени освоения гидроэнергетического потенциала ГЭС России //

Известия СПбГЭУ. 2023. №2 (140). С.34-40.

3. Реакторы на быстрых нейтронах // АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». URL: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/fast-neutron-reactors> (дата обращения: 23.12.2024).

4. Капингана Анаиду Адриану Жоау. Фотоэлектрическая энергия: эффективность преобразования, модуль и фотоэлектрические системы // Молодой ученый. 2021. № 11 (353). С. 22-25.

5. Гелиоэлектрическая станция // Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия». URL: <https://bigenc.ru/c/gelioelektricheskaja-stantsiia-d5a25a> (дата обращения: 23.12.2024).

6. Стребков Д. С., Ахмед Торки Ахмед Джайлани Состояние и перспективы развития солнечных электростанций с концентраторами // АЭЭ. 2009. №11. С.80-85.

7. Уссаев М., Текеева С. Развитие солнечных электростанций и их перспективы использования // Научный журнал « IN SITU ». 2022. №10. С.117-119.

УДК 678.028.31

О.С. Дмитриев, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой;
А.А. Барсуков, асп. (ТГТУ, г. Тамбов, Россия)

ВЛИЯНИЕ ТИПА АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Полимерные композиты (ПК) на основе термореактивных связующих армированные стеклянными, углеродными и органическими наполнителями (волокнами, тканями или матами) в настоящее время широко используются в современной технике. Их применяют в электро- и радиотехнике, ветроэнергетике и электронике, авиации и космонавтике, судо- и машиностроении и во многих других отраслях [1].

Технологический процесс производства деталей и изделий из ПК включает стадию тепловой обработки, в течение которой термореактивное связующее активизируется и происходит химический процесс сшивки полимера или отверждение. В результате этого процесса свойства исходных компонентов ПК существенно изменяются, изделие приобретает конечную форму и размеры, формируются конечные физико-механические свойства ПК. Поэтому отверждение ПК проводят по некоторому оптимальному температурно-временному режиму.

Одним из подходов нахождения такого технологического режима является математическое моделирование и оптимизация [2, 3].

Значимым этапом математического моделирования является идентификация параметров модели [2–4], включая теплофизические свойства (ТФС) и кинетические характеристики, которые определяются экспериментально с помощью специальных методов и приборов.

Применяемые для теплофизических измерений приборы, например, серии ИТ, ИТП-МГ, ПИТ, КИТ и другие предназначены в основном для определения ТФС твердых материалов и не подходит для исследования ТФС ПК в процессе отверждения. Поэтому исследование ТФС ПК при отверждении и расчет оптимального температурно-временного режима отверждения проводили с помощью специально разработанной информационно-измерительной системы (ИИС) процесса отверждения, содержащей в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, метрологическое и программное обеспечение, ориентированное на решение прямых, обратных и оптимизационных задач [3, 5].

Качество и свойства ПК определяются свойствами компонентов композита, на которые влияют межфазные взаимодействия связующего и наполнителя. Поэтому целью работы является изучение влияния типа армирующего наполнителя на ТФС ПК в отвержденном состоянии и при отверждении путем сравнения с ТФС чистого связующего.

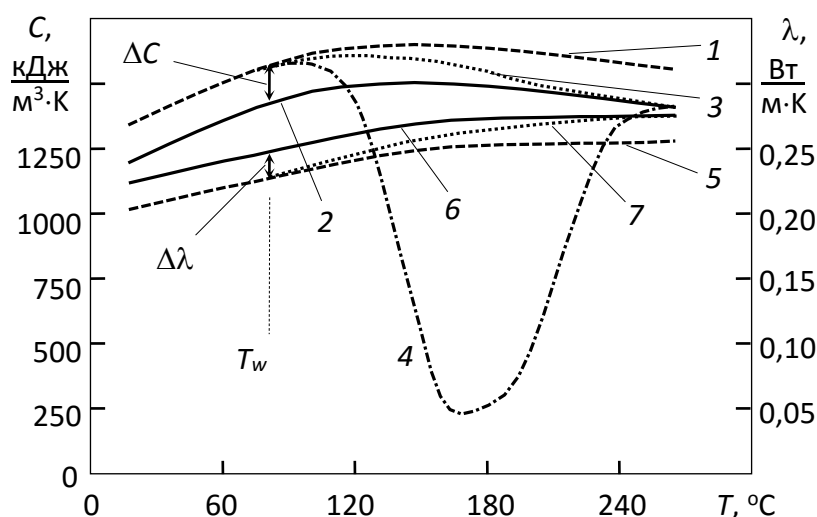


Рисунок 1 – ТФС стеклопластика СТ-69Н:

1 – $C_{но}(T)$; 2 – $C_{ом}(T)$; 3 – $C(T, \beta)$; 4 – $C_w(T)$; 5 – $\lambda_{но}(T)$; 6 – $\lambda_{ом}(T)$; 7 – $\lambda(T, \beta)$

В работе исследованы теплоёмкость C и теплопроводность λ трех типов полимерных композитов на основе одного и того же эпоксидного связующего ЭДТ-69Н. Это стеклопластик марки СТ-69Н, наполненный

стеклотканью Т-10-80 (начальное содержание связующего $\gamma_n = 0,51$), органопластик марки Органит-12Т, наполненный органической арамидной тканью СВМ (начальное содержание связующего $\gamma_n = 0,48$) и углепластик марки КМУ-11Э, наполненный углеродной волокнистой лентой ЭЛУР-П0,1 (начальное содержание связующего $\gamma_n = 0,53$). Результаты их исследования представлены на рис. 1, 2 и 3.

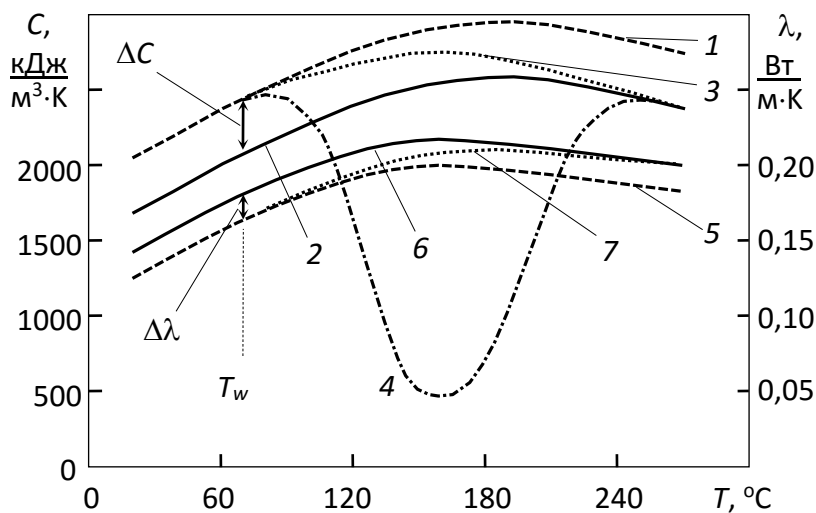


Рисунок 2 – ТФС органопластика Органит-12Т:

1 – $C_{но}(T)$; 2 – $C_{ом}(T)$; 3 – $C(T, \square)$; 4 – $C_w(T)$; 5 – $\lambda_{но}(T)$; 6 – $\lambda_{ом}(T)$; 7 – $\lambda(T, \square)$

Образцы собирали из пропитанных связующим ЭДТ-69Н листов наполнителя Т-10-80, СВМ и ЭЛУР-П0,1. Листы препрега нарезами в форме квадрата 100×100 мм и укладывали перекрестно в пакет толщиной 8 мм. Образцы подвергали нагреву, отверждению и повторному нагреву в ИИС с регистрацией температурного распределения.

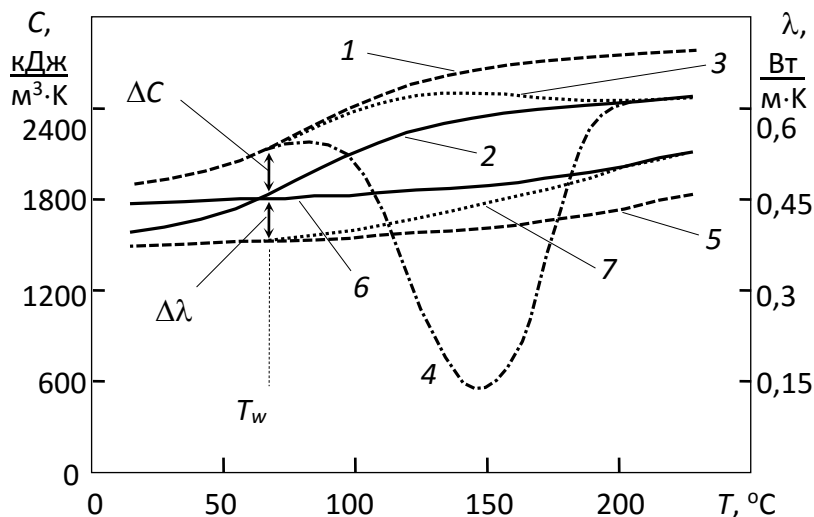


Рисунок 3 – ТФС углепластика КМУ-11Э:

1 – $C_{но}(T)$; 2 – $C_{ом}(T)$; 3 – $C(T, \beta)$; 4 – $C_w(T)$; 5 – $\lambda_{но}(T)$; 6 – $\lambda_{ом}(T)$; 7 – $\lambda(T, \beta)$

Образец отвержденного связующего изготавливали путем заливки жидкого связующего в форму нужного для измерения размера и последующего отверждения. ТФС определяли приборами LFA 457 и DSC 204 фирмы Netzsch. Термограммы нескольких экспериментов обрабатывали и рассчитывали средние ТФС. ТФС отвержденного без наполнителя эпоксидного связующего ЭДТ-69Н приведено на рис. 4.

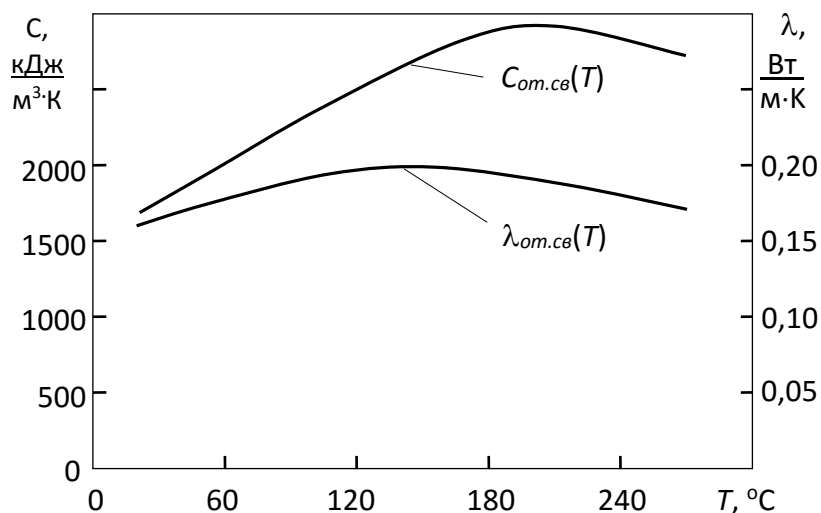


Рисунок 4 – ТФС отвержденного чистого связующего ЭДТ-69Н

Из графиков видно, что в зависимости от типа наполнителя не только изменяются зависимости определяемых ТФС, но и кинетика процесса отверждения связующего ЭДТ-69Н. Температура начала реакции отверждения T_w , при которой определяются ΔC и $\Delta \lambda$, лежит для стеклопластика в пределах $80 \div 90$ °C, для органопластика – в пределах $70 \div 80$ °C, для углепластика – в пределах $60 \div 70$ °C.

Характеры температурных зависимостей ТФС трех исследованных материалов и связующего достаточно похожи и во многом определяются свойствами связующего. Эффективная теплоёмкость $C_w(T)$ при достижении температуры начала интенсивной реакции отверждения T_w резко снижается в силу того, что эффективная теплоёмкость учитывает мощность тепловыделений $W(t)$, зависящую от скорости нагрева dT/dt и кинетики процесса отверждения, которая вычитается из теплоёмкости неотвержденного материала $C_{no}(T)$ [4]. После завершения реакции отверждения и тепловыделений теплоёмкость $C_w(T)$ перестает быть эффективной и становится теплоёмкостью отвержденного композита $C_{om}(T)$. Соответственно ведет себя и теплопроводность λ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. - 2020. –

Т. 90. № 4. - С. 331-334.

2. Мищенко С.В. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, А. В. Шаповалов, В. Н. Кириллов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. - 2001. - Т. 7, №1. - С. 7-19.

3. Dmitriev O.S. Thermo-chemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications / O. S. Dmitriev, A. A. Zhyvenkova, A. O. Dmitriev // Advanced Materials and Technologies. – 2016. - № 2. – P. 53-60.

4. Дмитриев О.С. Моделирование теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков, Д. Я. Баринов // Теплофизика и аэромеханика. - 2024. - Т. 31. № 2. - С. 355-370.

5. Живенкова А.А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – Т. 54. № 4. – С. 212-217.

УДК 542.455

А.Е. Хусанов, доц., канд. техн. наук;
И.Ю. Иристаев, специалист ВУК;
Д.М. Кенжебеков, докторант
(ЮКУ им. М.Ауэзова, Казахстан)

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА ТРУБА В ТРУБЕ С ТУРБУЛИЗАТОРОМ ПОТОКА РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

В последнее время для повышения эффективности работы теплообменного оборудования применяются пакеты CFD моделирования. Для моделирования теплообменника применялась программа Comsol Multiphysics. Программа является мощным инструментом для решения задач мультифизического моделирования, который предоставляет широкие возможности для анализа сложных инженерных систем [1,2].

Преимуществом применения CFD моделирования является визуализация течения потоков внутри аппарата.

Визуализация потока позволяет детально изучить распределение скорости теплоносителей, давления, температуры в различных зонах

теплообменника и обнаружить зоны с высокими потерями энергии и застойные зоны аппарата [2].

Одним из перспективных направлений по повышению эффективности теплообменников является применение завихрителей теплоносителя. Применение завихрителя способствует улучшению теплообмена за счет увеличения турбулентности внутри трубки.

В случае моделирования теплообменника труба в трубе с завихрителем потока программа предоставляет возможность учитывать взаимодействие различных физических процессов включая гидродинамику, теплообмен, механическое и химическое взаимодействие [2,3].

Теплообменник типа труба в трубе с витым завихрителем потока представляет собой интересный конструктивный подход, который способствует увеличению эффективности работы теплообменного аппарата. Применение пакета программы для анализа теплообменника теплообмена типа труба в трубе с завихрителем теплоносителя способствует повышению эффективности аппарата, улучшив характеристики и снизить эксплуатационные расходы [3].

Целью работы является моделирование теплообменника труба в трубе с завихрителем теплоносителя разного профиля, влияние формы завихрителя на эффективность теплообмена.

Моделирования экспериментального аппарата начинается с построения геометрии исследуемого аппарата. Геометрия аппарата приведена на рисунке 1.

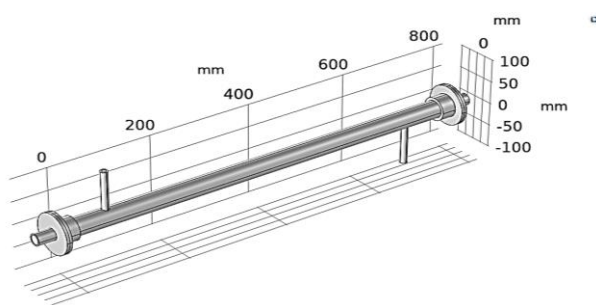


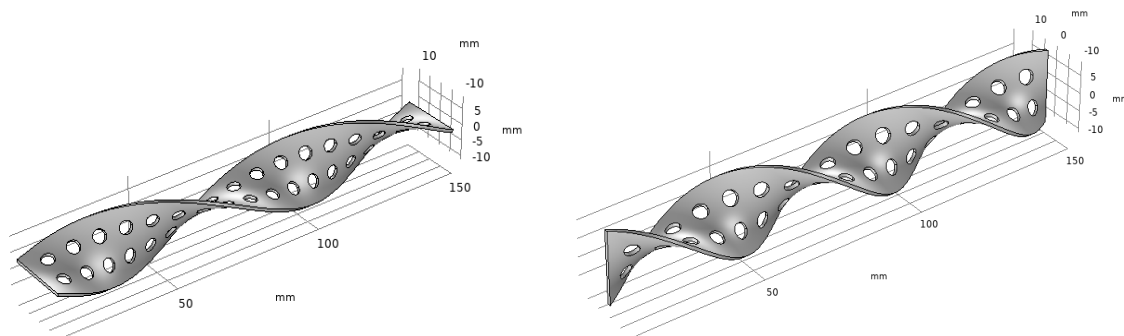
Рисунок 1 – Теплообменник труба в трубе

Турбулизатор потока представляет собой плоскую стальную ленту с изгибом, геометрия завихрителей представлена на рисунке 2. Для моделирования использовались два типа завихрителя, с изгибом в 360 и с изгибом 540. Оба турбулизатора расположены во внутренней трубке аппарата.

В качестве материала для корпуса аппарата и витой ленты использовалась сталь марки Steel AISI 4340. Горячим теплоносителем

использовалось растительное масло а для охлаждения применится вода.

В программу интегрированы необходимые формулы и закономерности. Для исследования гидродинамики используется формулы, основанные на уравнениях Навье – Стокса.



а – профиль 360

б – профиль 540

Рисунок 2 – Турбулизаторы потока

В ходе моделирования теплообмена было использовано две физики. Для описания течения жидкости внутри аппарата laminar flow, а для моделирования теплообмена Heat transfer in fluid and solid [4,5]:

$$\rho(u * \nabla)u = \nabla * [-pI + K] + F \quad (1)$$

где: ρ – плотность жидкости, кг*м³; u – вектор скорости, м/с; ∇ – оператор градиента, который применяется к вектору скорости u ; p – давление жидкости, Па; I – единичная матрица (тензор единичного порядка); K – тензор вязкости, Па*с; F – внешние силы (сила тяжести).

Скорость горячего теплоносителя составляло: $v_1 - 0,1$ м/с; $v_2 - 0,5$ м/с; $v_3 - 1$ м/с; $v_4 - 1,5$ м/с; $v_5 - 2$ м/с.

Уравнения применимое в физике Heat transfer in fluid and solid (2) описывает процесс теплообмена в жидкости и в твердом материале. Выражение помогает понять, как скорость, плотность потока и температура теплоносителей влияют на эффективность теплообмена [4,5]:

$$\rho C_p * u * \nabla T + \Delta q = Q + Q_{tem} \quad (2)$$

где: C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг*К); ∇T – градиент температуры, К/м; Δq – изменение теплового потока, Дж/с; Q – общий источник тепла, Вт; Q_{tem} – дополнительный источник теплоты, Вт.

На рисунке 3 приводятся результаты моделирования теплообмена с завихрителем в 360 градусов. Высокая степень охлаждения потока отмечается при скорости масла в 0,1 м/с. Снижение температуры

составило на 18,5С. При этом холодная вода нагрелась на 17,6С. Скачкообразное изменение линии температуры на графике говорит о завихрении теплоносителя внутри трубы.

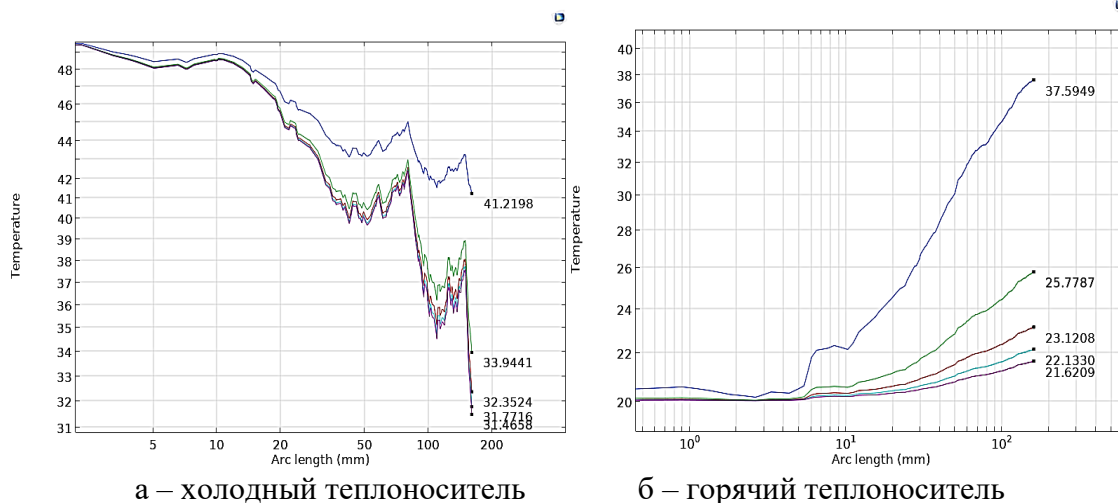


Рисунок 3 – Результаты теплообмена с турбулизатором в 360 градусов

На рисунке 4 приведены результаты моделирования с турбулизатором в 540 градусов. Высокая эффективность теплообмена отмечается при скорости потока в 0,1 м/с и 0,5 м/с. Температура при 0,1 м/с снизилась практически в 2 раза, при 0,5 м/с на 13С. Холодный теплоноситель повысился на 16С. Как видно из результатов моделирования наиболее эффективным типом завихрителя является лента с изгибом в 540.

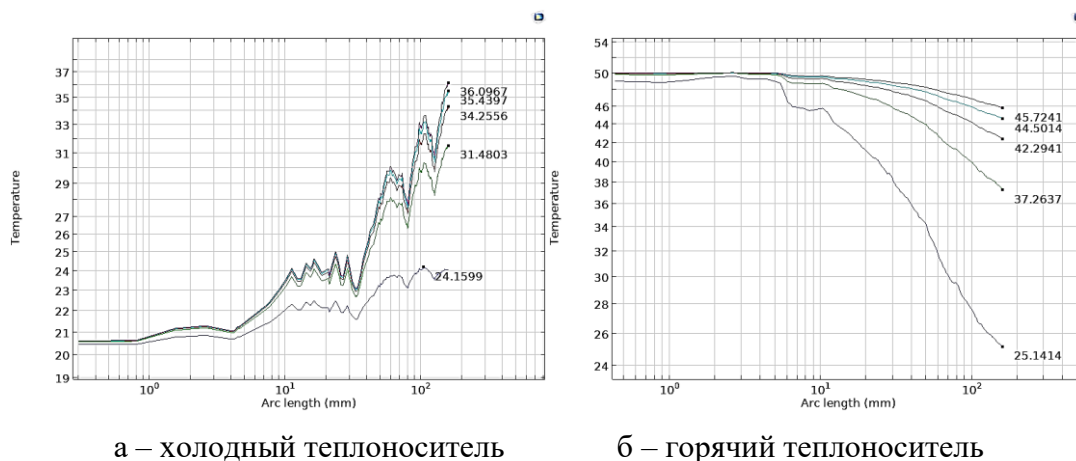


Рисунок 4 – Результаты теплообмена с турбулизатором в 540 градусов

Турбулизатор с изгибом профиля в 540 градусов создает более сильную турбулентность по сравнению с профилем изгиба в 360 градусов. Угловой изгиб в 540 градусов приводит к более длинному пути, по которому проходит горячий теплоноситель. Это увеличивает время

контакта рабочего вещества с холодными и горячими поверхностями теплообменника, что способствует к более эффективному теплообмену.

При изгибе в 540 градусов значительно снижается вероятность возникновения застойных зон, которые возникают у профиля в 360 градусов. Зоны с низкой или с нулевой скоростью приводят к снижению эффективности теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

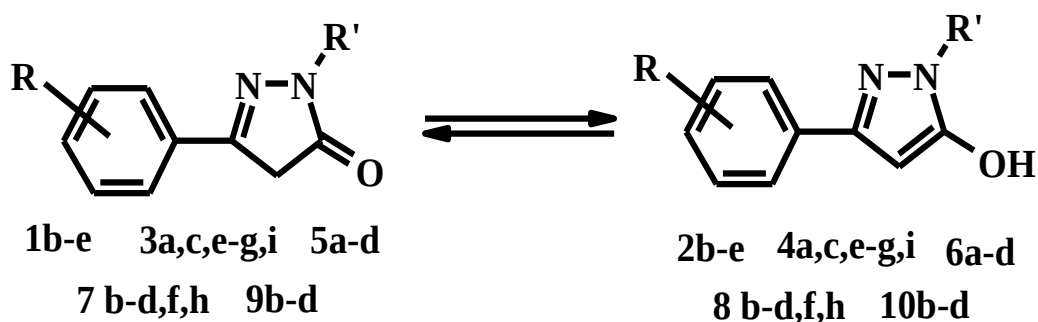
1. Курушин А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL – М., «One-Book», 2016 – 376с.
2. Benmbarek, M., Moujaes, S. F. CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement for Twisted Tape Inserted in spirally Corrugated Tubes. 2023, 2023090195. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.0195.v1>
3. Kenzhebekov D.M., Khussanov A.Ye., Iristaev I., Zholshybek A., Dzhanabayev D.Zh. Multiphysical modeling of a pipe-in-pipe heat exchanger with a flow intensifier in the form of a twisted profiled strip. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan series chemistry and technology ISSN 2224–5286 Volume 4. Number 461 (2024), 111–128 <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.254>.
4. Comsol multiphysics reference manual. 2019 – 200с.
5. Heat transfer module user's guide. 2019 – 788с.

УДК 547.775

В.Н. Ковганко, доц., канд. хим. наук;
Д.С. Дорошук, инженер;
А.А. Маслаков, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ЯМР ^1H И ^{13}C СОЕДИНЕНИЙ РЯДА 1,3-ДИАРИЛПИРАЗОЛ-5-ОНОВ

Интерес к замещенным 4-ацилпиразолонам связан с их способностью образовывать устойчивые хелатные комплексы с катионами металлов. Это позволяет использовать соединения данного ряда в качестве эффективных экстрагентов для выделения и определения катионов металлов. Устойчивость соответствующих хелатов и эффективность экстракции зависит от способности 4-ацилпиразолонов существовать в форме соответствующих 4-ацилпиразол-5-олов[1].



a R= H; b R= 4-OC₃H₇; c R=4-OC₇H₁₅; d R=4-OC₈H₁₇;
e R=4-F; f R=2-F; g R=3-F,4-OMe; h R=4-Cl,3,6-F,F; i R=Ph
1,2 R'= H; 3,4 R'=Ph; 5,6 R'=4-OMe-C₆H₄
7,8 R'=4-NO₂; 9,10 R'=2,4-NO₂,NO₂

Соединения ряда 3-арилпиразолонов являются ключевыми промежуточными веществами при получении 4-ацилпиразолонов. Нашей исследовательской группой синтезирован ряд 3-арилпиразолонов 1,3,5,7,9 [2–4]. Известно, что для замещенных пиразол-5-онов характерна кето-енольная таутомерия и данные вещества могут существовать в виде 5-гидроксипиразолов. При проведении синтетического исследования для доказательства строения синтезированных соединений нами использовались данные спектроскопии ЯМР на ядрах ^1H и ^{13}C . При этом используя ЯМР спектры синтезированных веществ можно оценить относительную устойчивость соответствующих енольных

форм **2,4,6,8,10** для растворов в различных дейтерированных растворителях. Данная информация полезна, в частности, при планировании направленного синтеза новых 4-ацилпиразолонов.

По ЯМР ^1H спектрам различные формы синтезированных 3-арилпиразолонов можно идентифицировать по соответствующим сигналам групп 4- CH_2 пиразол-5-онов или 4- CH групп пиразол-5-олов. Также наблюдаются различия в сигналах ароматических протонов 3-арильного заместителя.

ВЯМР ^1H спектрах кетонной форме соответствует сигнал 4- CH_2 протонов в области δ 4.1–4.2 м.д. Для енольной формы синтезированных соединений характерен однопротонный синглет 4- CH в области δ 6.0–6.1 м.д. Также для енольной формы может наблюдаться уширенный синглет протона группы OH , химический сдвиг которого зависит от типа растворителя. В частности, для растворов в диметилсульфоксиде сигнал OH группы проявляется при δ 12.5 м.д., для растворов в дейтеродиоксане при δ 10.4 м.д.

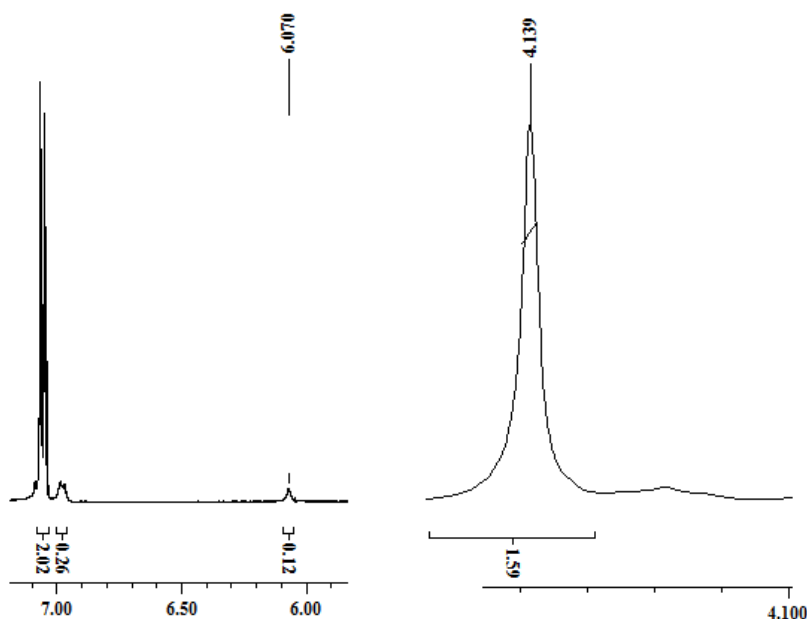


Рисунок 1 – Фрагменты ЯМР ^1H спектра 1-(4-нитрофенил)-3-(4-гептилоксифенил)-пиразол-5-она в дейтероацетоне

На рис. 1 показаны фрагменты ЯМР ^1H спектра соединения **7с**, зарегистрированного в дейтероацетоне. Преобладающей кетонной форме **7с** соответствует синглет при δ 4.14 м.д. Енольной форме **8с** соответствует синглет при 6.07 м.д.

По ЯМР ^{13}C спектрам различные формы синтезированных 3-арилпиразолонов также можно идентифицировать по соответствующим сигналам атомов углерода групп 4- CH_2 пиразол-5-онов или 4- CH групп пиразол-5-олов. ВЯМР ^{13}C спектрах кетонной форме соответ-

стствует сигнал 4-CH₂ группы около δ 40.0 м.д. Для енольной формы синтезированных соединений характерен сигнал 4-CH в области δ 85.5 м.д. Кроме того, для кетонной формы в спектрах ЯМР ¹³C фиксируется сигнал углерода C=O группы около δ 171.0 м.д.

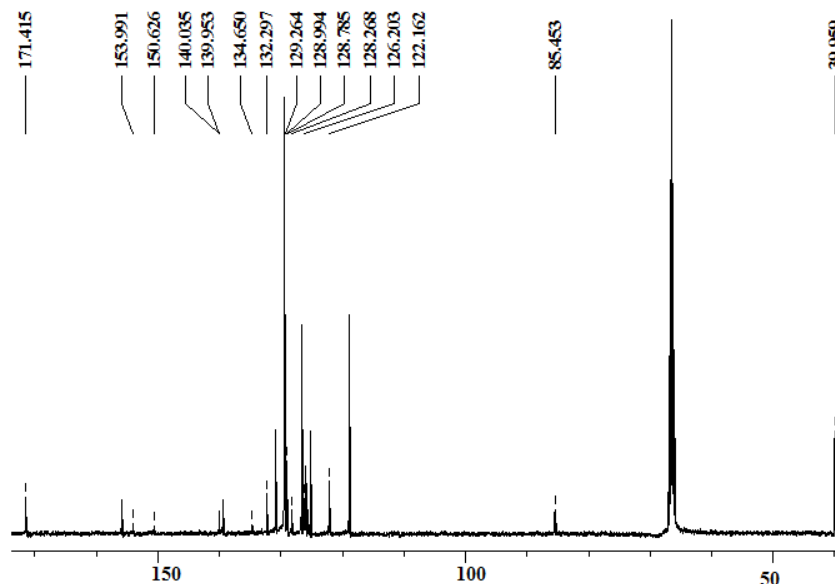


Рисунок 2—ЯМР ¹³C спектр 1,3-дифенилпиразол-5-она
3i,4iv дейтеродиоксанае

Указанные особенности проиллюстрированы на рис. 2, на котором представлен ЯМР ¹³C спектр раствора в дейтеродиоксане пиразола в кетонной и енольной форме (3i:4i= 2 : 1, по данным спектра ЯМР ¹H).

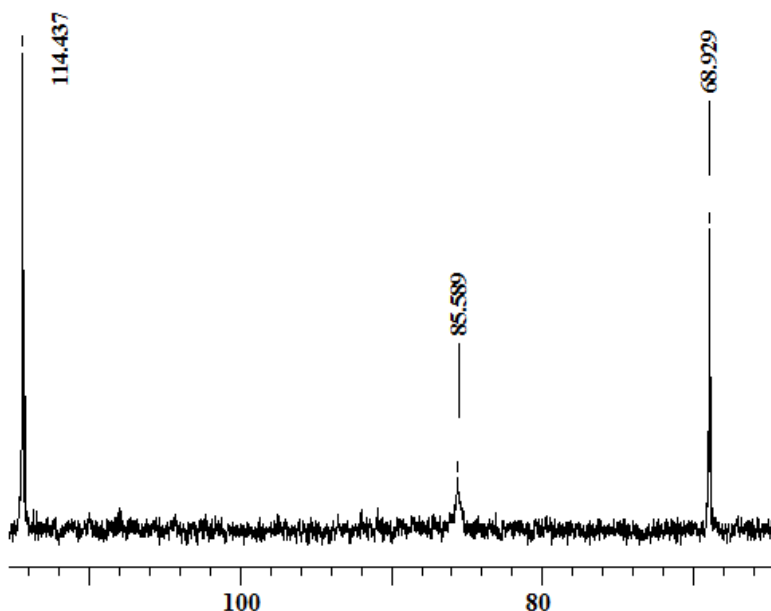


Рисунок 3— Фрагменты ЯМР ¹³C спектра 1-(4-нитрофенил)-3-(4-пропилоксифенил)-пиразол-5-она8b в дейтеродиметилсульфоксиде

В растворах в дейтеродиметилсульфоксиде синтезированные пиразолы находятся только венольной форме. Это подтверждается как спектрами ЯМР ^1H , так и спектрами ЯМР ^{13}C . На рис. 3 показан фрагмент ЯМР ^{13}C спектра соединения **8b**, зарегистрированного в дейтеродиметилсульфоксиде. Енольной форме **8b** соответствует сигнал атома углерода группы 4-СН пиразольного цикла при δ 85.59 м.д.

Судя по данным ЯМР ^1H спектров растворов изученных соединений в дейтеропиридине, дейтеродиметилформамиде и дейтеродиметилсульфоксиде более стабильна енольная форма. Для растворов в дейтеродиоксане, дейтероацетонитриле и дейтероацетоне характерно равновесие с преобладанием кетонной формы (от 2:1 до 4:1).

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» (подпрограмма Синтез и направленное модифицирование регуляторов биопроцессов» (Биорегуляторы), задание 2.1 (НИР 8).

ЛИТЕРАТУРА

1. J.Arichi, G.Goetz-Grandmont, J.P. Brunette. Solvent extraction of europium (III) from nitrate medium with 4-acyl-isoxazol-5-ones and 4-acyl-5-hydroxy-pyrazoles. Effect of salts and diluents. / Hydrometallurgy. – 2006. – Vol. 82. – P. 100–109.

2. Ковганко В.Н., Ковганко Н.Н., Слабко И.Н., Дорощук Д.С., Кручик В.И. Использование замещенных 3-арил-3-кетозэфиров в синтезе биологически активных и мезогенных пиразолов / Сборник тезисов докладов Республиканской конференции с международным участием «Физико-химическая биология как основа современной медицины», посвященной 110-летию со дня рождения В.А. Бандарина. Ч. 1 / под ред. В.В. Хрусталёва, Т.А. Хрусталёвой. – Минск: БГМУ, 2019. С. 144.

3. Ковганко В.Н., Ковганко Н.Н., Дорощук Д.С. Новый подход к синтезу пиразолсодержащих жидкокристаллических соединений. // Доклады НАН Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 4. – С. 63–67.

4. Ковганко В.Н., Ковганко Н.Н., Симоненко Л.И., Слабко И.Н., Зинькова Т.Н., Креч А.В. 3-Арил-3-кетозэфиры в синтезе микобактерицидов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2013. – № 3. – С. 94–99.

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА
СТУДЕНТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
ХИМИКО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН**

На кафедре физической, коллоидной и аналитической химии образовательный процесс осуществляется с использованием информационных технологий: компьютерных презентаций и видеоматериалов теоретического курсов изучаемых дисциплин, применение системы LMS Moodle дистанционного обучения для тестового контроля знаний и в обучающем режиме с целью самостоятельной работы, клиент-серверное тестирование студентов для промежуточного контроля знаний.

Таким образом, важной задачей данной работы является совершенствование системы образовательного процесса с целью повышения интереса у обучающихся и степени усваивания изучаемых дисциплин химического направления.

Для успешного изучения дисциплин «Аналитическая химия», «Общая и аналитическая химия», «Аналитическая химия и физико-химические методы анализа» студентами 1–3 курсов химико-технологических специальностей в Белорусском государственном технологическом университете разработан адаптивный учебно-методический комплекс, который включает в себя ряд учебных и учебно-методических пособий [1–4]. Пособия подготовлены совместными усилиями преподавателей различных кафедр университета, которые старались подготовить учащихся к осмысленному чтению и пониманию учебной и научной литературы по химико-аналитическим дисциплинам, восприятию и пониманию изучаемого предмета на базовом уровне с унификацией терминов и обозначений определяемых химических величин.

Разработаны электронно-методические курсы на основе системы дистанционного обучения LMS Moodle, позволяющие самостоятельно выполнять студентам конкретные методики анализа, по следующим разделам: потенциометрия, кондуктометрия, вольтамперометрия, хроматография и другие [5]. В организации учебного процесса обучающихся первых и последующих курсов университета главный упор делается как на организацию и индивидуализацию их самостоятельной работы в аудитории во время занятий, так и вне их. Система LMS Moodle позволяет преподавателю управлять и контроли-

ровать самостоятельную работу студентов при изучении теоретического материала и решении расчетных задач. Использование данного информационного ресурса позволяет студентам тщательно подготовиться к выполнению химико-экспериментальных работ на лабораторных занятиях по соответствующей дисциплине. Для успешного внедрения дистанционной формы обучения в учебный процесс необходимо наличие информационных и методических разработок, включающих электронные конспекты лекций, методические указания по выполнению экспериментальных и расчетных лабораторных работ, вопросы для подготовки к защите и допуску к выполнению, написанию коллоквиумов и тестов-заданий.

С целью облегчения выполнения различных заданий, а также успешного освоения химико-аналитических дисциплин, в т.ч. и для их самостоятельной работы на кафедре оптимизированы условия проведения дистанционного и контрольного компьютерного тестирования, усовершенствована и расширена база тестовых заданий. По соответствующим учебным дисциплинам разработаны и внедрены в учебный процесс новые лабораторные работы, разработано и обновлено прикладное программное обеспечение на основе электронных таблиц для графической, математической и статистической обработки экспериментальных результатов.

План изучения определенного раздела конкретного метода анализа включает в себя следующие этапы: изучение теоретического материала; получение допуска к выполнению лабораторной работы на основании изученного материала; проработка методических указаний к выполнению эксперимента и задания; непосредственное выполнение лабораторной работы; оформление отчета с математическими расчетами, графической обработкой экспериментально полученных данных (построение кривых титрования, графиков, диаграмм) и выводами по работе с точно установленной погрешностью по результатам конкретной методики определения; защита лабораторной работы с решением типовых расчетных задач и компьютерное тестирование. Использование электронных средств обучения позволяет существенно интенсифицировать процесс изучения дисциплины и организовать оперативную обратную связь.

К образовательному процессу привлекаются преподаватели, имеющие большой опыт работы и обладающие такими качествами как высокий профессионализм, коммуникабельность, доброжелательность, умение учитывать национально-психологические особенности обучающихся.

Установлено, что эффективно организованная аудиторная и самостоятельная работа студентов с использованием современных электронных технологий и высокоэффективных возможностей системы LMS Moodle при преподавании курсов «Аналитическая химия», «Общая и аналитическая химия», «Аналитическая химия и физико-химические методы анализа» способствует развитию у них навыков освоения различных методик анализов с получением, обработкой и систематизацией экспериментальных полученных данных, что позволит сформировать в будущем необходимые базовые навыки и умения для того, чтобы быть востребованным и высокквалифицированным специалистом в соответствующей отрасли промышленности Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-химические методы анализа: учеб. пособие для студентов химико-технол. специальностей: в 2 ч. / Н. А. Коваленко, В. Н. Леонтьев, А. Р. Цыганов. – Минск: БГТУ, 2023. – 383 с.
2. Аналитическая химия. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студентов химико-технологических специальностей / Н. А. Коваленко и [др.]. – Минск: БГТУ, 2024. – 107 с.
3. Коваленко, Н. А. Аналитическая химия: учеб.-метод. пособие для студентов химико-технологических специальностей: в 2 ч. с грифом УМО БГТУ / Н. А. Коваленко, А. А. Сакович, Е. В. Радион. – Минск: БГТУ, 2024. – 401 с.
4. Коваленко Н. А., Супиченко Г. Н., Болвако А. К. Использование LMS Moodle при изучении хроматографических методов анализа студентами химико-технологических специальностей // Инновации в образовании. – 2016. – № 3. – С. 99–104.
5. Система управления обучением «LMS Moodle» [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www/moodle.org>.

КОМПОЗИЦИОННАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА КАЛЬЦИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ВИСМУТОМ

Слоистый кобальтит кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ является перспективным термоэлектрическим материалом, однако свойства керамических материалов на основе слоистого кобальтита кальция уступают таковым для монокристаллов. Ввиду этого применяются различные подходы по улучшению этих свойств, а именно:

- а) частичное замещение Са и/или Со в структуре;
- б) применение «мягких» методов синтеза;
- в) применение специальных методик спекания;
- г) создание в керамике фазовой неоднородности.

В данной работе исследуется возможность улучшения свойств керамических материалов на основе слоистого кобальтита кальция с помощью применения «мягкого» метода синтеза, создание фазовой неоднородности путем модификации частицами Вi, а также применения методики двухстадийного спекания.

В качестве «мягкого» метода синтеза выступал полимерный метод, описанный в работе [1], с помощью которого получали порошок слоистого кобальтита кальция. К полученному порошку добавляли частицы Вi в количестве 3 мас. %, после чего спекали при помощи двухстадийной методики в 3-х режимах, с температурами первой стадии 1273, 1373 и 1473 К, а температура второй стадии во всех режимах составила 1173 К. Идентификацию образцов проводили при помощи рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Bruker D8 XRD Advance, $\text{CuK}\alpha$ -излучение). Значения кажущейся плотности ρ_k , пористости Π , удельной электропроводности σ , коэффициента термо-ЭДС S и фактора мощности P спеченной керамики определяли по методикам, описанным в работе [2], а взвешенную подвижность μ и концентрацию носителей заряда p рассчитывали по формулам, описанным в работе [3].

Рентгенофазовый анализ образцов показал наличие основной фазы слоистого кобальтита кальция во всех образцах, пики которой обозначены на рис. 1 индексами Миллера. Также были установлено присутствие в образцах примесных фаз, а именно $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$, Co_3O_4 , Bi_2O_3 . Присутствие в образцах фаз $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ и Co_3O_4 объясняется их образованием при перитектоидном распаде фазы $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ при темпе-

ратуре 1173 К. Значения кажущейся плотности изменялись в интервале 3.03–3.65 г/см³, а значения пористости – в интервале 24–31 %. Максимальное значение плотности и минимальное пористости отвечали образцу, спеченному при 1273 К.

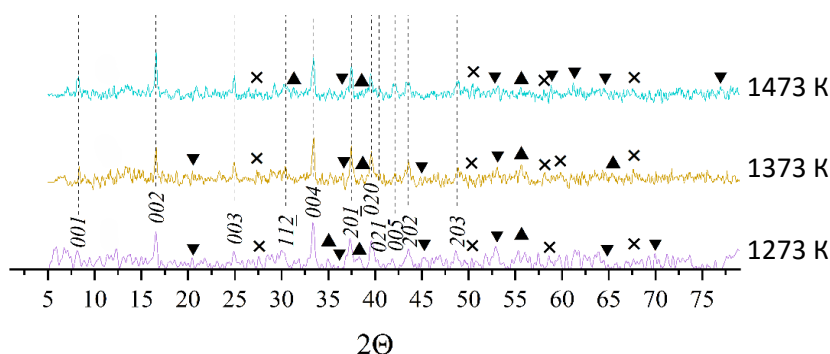


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов композиционной керамики
 ∇ – $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$, $\blacktriangle$ – Co_3O_4 , $\square$ – Bi_2O_3

Температурные зависимости образцов, спеченных при 1373 и 1473 К носили полупроводниковый характер, а для образца, спеченного при 1273 К, вблизи комнатной температуры наблюдался металлический характер проводимости, который вблизи 500 К изменялся на полупроводниковый (рис. 2а). Максимальное значение удельной электропроводности отвечало образцу, спеченному при 1273 К, и было в $\sim 3,6$ раза выше, чем для базового слоистого кобальтита кальция.

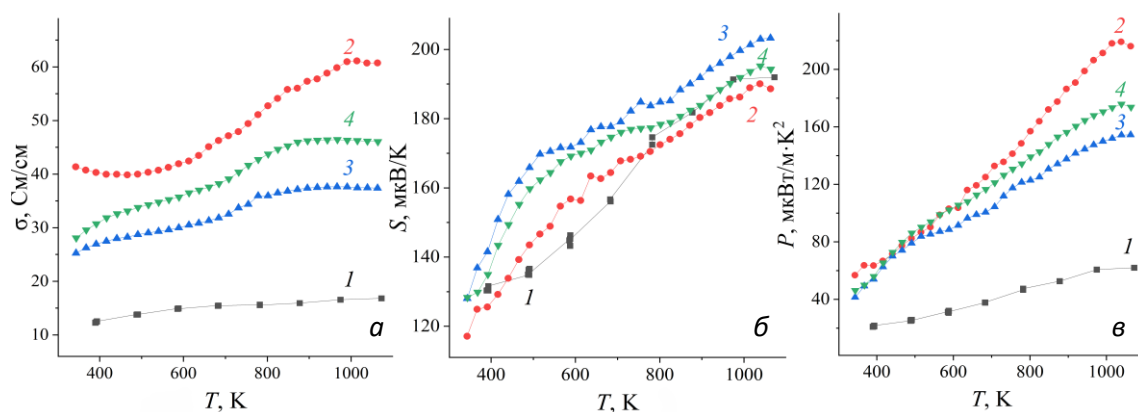


Рисунок 2 – Температурные зависимости удельной электропроводности (а), коэффициента термо-ЭДС (б) и фактора мощности (в) базового $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ (1) и образцов композиционной керамики $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}/3$ мас. % Bi , спеченных при 1273 (2), 1373 (3) и 1473 (4) К

Значения коэффициента термо-ЭДС всех образцов были положительными, что свидетельствует о «дырках» как основных носителях заряда (рис. 2б). Сами значения росли при увеличении температуры и были близки к таковым для базового слоистого кобальтита кальция. Значения фактора мощности для всех образцов композиционной

керамики были выше, чем для базового слоистого кобальтита кальция, а максимальное значение было в $\sim 3,5$ раза выше, чем для базовой фазы (рис. 2в).

Согласно расчетам концентрация носителей заряда в образцах композиционной керамики после модификации Vi практически не изменялась, а взвешенная подвижность возрастала, что и обусловило повышение термоэлектрических характеристик (рис. 3).

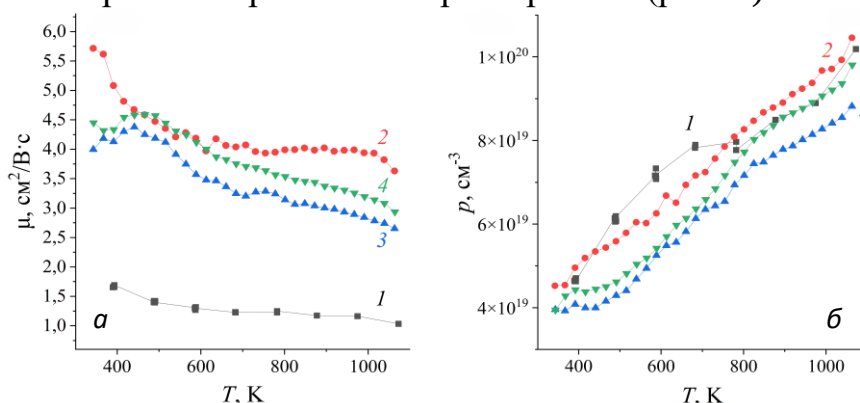


Рисунок 3 – Температурные зависимости взвешенной подвижности (а) и концентрации носителей заряда (б) базового $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ (1) и образцов композиционной керамики $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}/3$ мас. % Vi , спеченных при 1000 (2), 1100 (3) и 1200 (4) °C

В результате выполнения работы с применением полимерного метода синтеза и двухстадийной методики спекания были получены керамические композиционные термоэлектрические материалы на основе слоистого кобальтита кальция, модифицированного частицами Vi , с улучшенными характеристиками, которые является перспективными для применения в составе эффективных термоэлектрических преобразователей высокопотенциального тепла в электроэнергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мацукевич И.В., Клындюк А.И. Получение слоистого кобальтита кальция $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ растворными методами и его свойства / И.В. Мацукевич, А.И. Клындюк // Украинский химический журнал. – 2013. – Т. 79, № 12. – С. 104–110.
2. Влияние добавки частиц меди на термоэлектрические свойства керамики $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$, полученной методом двухстадийного спекания / А.И. Клындюк [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67, № 2. – С. 248–256.
3. Латыпов Р.С., Тарайковский М.А. Термоэлектрическая керамика на базе слоистого кобальтита кальция, модифицированного марганцем // Инновационные материалы и технологии 2024: мат. докл. межд. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 31 марта – 04 апреля 2024 г. / БГТУ. – Минск, БГТУ, 2024. – С. 61–64.

М.А. Осипенко, инженер;
И.И. Курило, доц., зав. кафедрой ФКиАХ, канд. хим. наук;
А.Р. Цыганов, академик НАН Беларуси, д-р с/х наук, проф.
(БГТУ, г. Минск)

КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СВЕРХЛЕГКИХ СПЛАВОВ МАГНИЯ AZ31-xLi В РАСТВОРАХ NaCl, СОДЕРЖАЩИХ МОЛИБДАТЫ

Снижение массы изделий авиационной, машино- и приборостроительной отраслей промышленности приводит не только к снижению расхода материалов на этапе проектирования и производства, но и к существенному повышению эффективности их эксплуатации в результате сокращения расхода топлива и, как следствие, уменьшению экологической нагрузки на окружающую среду. Например, снижение веса легкового автомобиля на 10 % позволяет достичь экономии топлива до 30 % без каких-либо серьезных изменений в конструкции автомобиля [1]. Легирование магния литием позволяет получать сверхпластичные и сверхлегкие сплавы, плотность которых может снижаться от 1.6 до 1.3 г/см³. Однако наблюдаемое при этом существенное уменьшение коррозионной устойчивости литийсодержащих сплавов магния ограничивает их широкое промышленное применение. Таким образом, изучение коррозионного поведения литийсодержащих сплавов магния представляет как научный, так и практический интерес.

Цель исследования – установление кинетических особенностей и механизмов коррозии магниевых сплавов AZ31-xLi ($x = 0, 4, 8, 12$ масс. %) в растворах 0.05 М хлорида натрия.

Для изучения коррозионного поведения образцов использовали потенциостат/гальваностат PGSTAT 302N (MethromAutolab), оснащенный модулем измерения импеданса FRA32M. В качестве электрода сравнения выступал насыщенный хлоридсеребряный электрод, вспомогательного электрода – платиновая сетка площадью 2 см². Активная площадь рабочего электрода составляла 1 см². В качестве исходной коррозионной среды использовали 0.05 М раствор NaCl. Для установления скорости коррозии сплавов магния использовали метод линейной вольтамперометрии. Потенциодинамические поляризационные кривые (ПК) снимали в диапазоне потенциалов от –300 до +700 мВ относительно потенциала разомкнутой цепи E_{pc} при скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Электрохимические параметры процесса коррозии (потенциал и плотность тока) определяли с использовани-

ем алгоритма Левенберга-Марквардта в программном пакете «Tafel-Extrapolation» (OriginPro 2021).

Потенциодинамическая поляризация, основанная на изменении потенциала электрода при пропускании тока через раствор электролита, является одним из наиболее используемых в коррозионных исследованиях электрохимических методов. В зависимости от направления поляризации рабочего электрода наблюдаются доминирующие реакции окисления либо восстановления, что позволяет установить значения потенциала и плотности тока коррозии (скорость коррозии) металла.

На рис. 1 представлены поляризационные кривые (ПК) исследуемых сплавов магния AZ31-*x*Li в 0.05 М растворе NaCl. Установлено, что значения плотности токов коррозии, рассчитанные путем экстраполяции тафельских участков анодной и катодной ветви ПК к потенциалу коррозии $E_{\text{корр}}$, составляют $1.14 \cdot 10^{-5}$, $6.45 \cdot 10^{-5}$, $8.32 \cdot 10^{-5}$ и $1.26 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ для магниевых сплавов AZ31, AZ31-4Li, AZ31-8Li и AZ31-12Li соответственно.

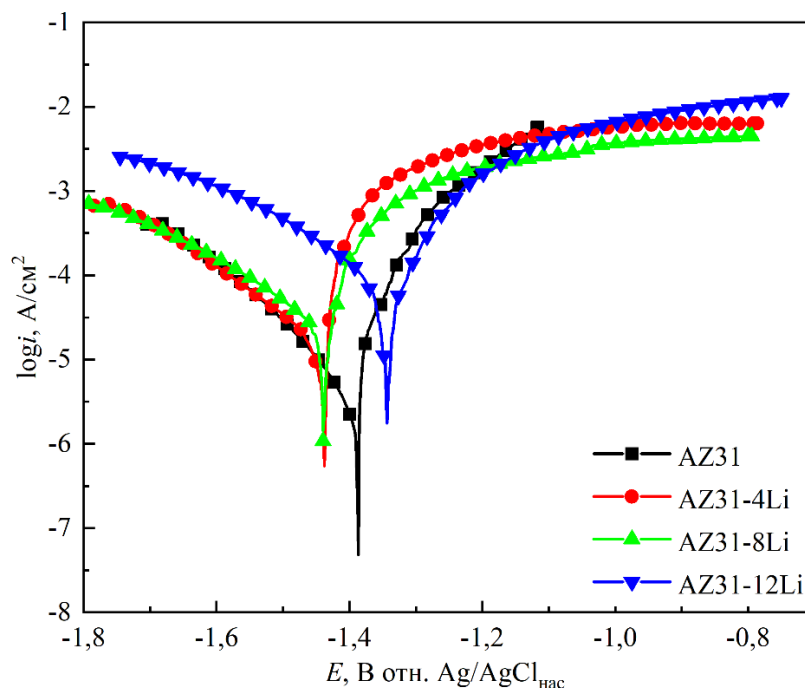


Рисунок 1 – Потенциодинамические поляризационные кривые сплавов AZ31-*x*Li (*x* = 0, 4, 8, 12 масс. %) в 0.05 М растворе NaCl

Анализ тафельских участков поляризационных кривых показал, что по мере увеличения содержания лития в сплаве от 0 до 12 масс. % наблюдается увеличение угла наклона $|b_k|$ тафельского участка катодной кривой, что может быть вызвано подщелачиванием приэлектродной области. В свою очередь, коэффициенты b_a характе-

ризуются низкими значениями, что указывает на процесс активного растворения исследуемых образцов.

Согласно полученным данным, с увеличением содержания лития от 4 до 12 масс. % в исследуемых сплавах наблюдается смещение потенциала коррозии в область более положительных значений, что обычно свидетельствует о замедлении анодных процессов и увеличении коррозионной стойкости образцов. Однако в нашем случае параллельно с возрастанием $E_{\text{корр}}$ наблюдается увеличение значений плотностей токов коррозии, свидетельствующее о снижении коррозионной устойчивости. Это несоответствие можно объяснить т. н. явлением катодной активации. Суть этого явления заключается в том, что при анодной поляризации магния наряду с анодным окислением металла наблюдается процесс его активного химического взаимодействия с водным раствором электролита, сопровождающийся выделением водорода. Соответственно, кинетика анодных процессов будет существенно зависеть не только от процесса электрохимического восстановления воды на катодных участках, но и от параллельно протекающего процесса химического восстановления воды металлическим магнием, скорость которого возрастает при увеличении анодной поляризации. Таким образом, наблюдаемое смещение $E_{\text{корр}}$ в область положительных значений обусловлено усилением катодной активности (в ответ на усиление анодной активности).

Таким образом, с использованием комплекса электрохимических методов исследований установлено, что с ростом содержания лития в составе магниевых сплавов и с увеличением времени коррозионных испытаний происходит монотонное снижение коррозионной устойчивости исследуемых сплавов в ряду $AZ31 \rightarrow AZ31-4Li \rightarrow AZ31-8Li \rightarrow AZ31-12Li$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за финансовую поддержку Грант Президента Республики Беларусь и Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (X24MB-008 «Экологически безопасные ингибиторы коррозии литийсодержащих сплавов магния на основе растворимых соединений молибдена (VI)»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion /M. Esmaily, J.E. Svensson, S. Fajardo, N. Birbilis[et al] // Prog. Mater. Sci. – 2017. – Vol. 89. – P. 92–193.

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, МИКРОСТРУКТУРА
И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ** **$\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$**

В настоящее время кислороддефицитные слоистые перовскиты (КСП) $\text{AA}'\text{BB}'\text{O}_{5+\delta}$ исследуются широко и многообразно [1–4]. Интерес к ним обусловлен их уникальными и разнообразными свойствами, позволяющими рассматривать их в качестве функциональных материалов различных устройств, в частности, твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). ТОТЭ являются альтернативными устройствами получения электроэнергии, работающими на водороде и водородсодержащем топливе (например, спиртах, углеводородах и др.) их главными достоинствами являются высокая эффективность (КПД ≈ 50 –80 %) и экологическая чистота. Они широко используются в промышленности, на транспорте и в бытовой сфере [4].

Слоистые кобальтиты $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ ($\text{Ln} - \text{Y}$, редкоземельный элемент (РЗЭ)), часто рассматриваются как электродные материалы ТОТЭ, так как обладают высокой каталитической активностью в реакции восстановления кислорода и большими значениями электропроводности, но имеют ряд недостатков, которые устраняют частичным замещением кобальта другими $3d$ -металлами, бария – другими щелочноземельными элементами и магнием, созданием вакансий в катионных подрешетках: РЗЭ, бария и $3d$ -металла, и др. [3–6].

Цель данной работы заключается в изучении влияния дефицита катионов в подрешетках неодима и бария на кристаллическую структуру, микроструктуру, термическую стабильность и тепловое расширение производных слоистого перовскита $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$.

Синтез керамических образцов $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ ($x = 0.00$ – 0.15) осуществляли по керамической технологии согласно методикам, описанным в работах [3, 5]. Синтез проводили на воздухе при 1173 К в течение 40 ч, а спекание – при 1273 К 9 ч.

Идентификацию кристаллической структуры осуществляли методами рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр Bruker D8, $\text{Cu-K}\alpha$ -излучение, Ni-фильтр) и ИК-спектроскопии поглощения (ИК-Фурье спектрометр Nexus E.S.P.). Величины областей когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали с применением формулы Шеррера ($D_{\text{Ш}}$), а также методами Вильямсона–Холла ($D_{\text{В-Х}}$) и размера–

напряжения (D_{P-H}) [3]. Определение индекса кислородной нестехиометрии (δ) проводили при помощи иодометрического титрования [6]. Пористость рассчитывали по геометрическим размерам и массе образцов согласно методике, описанной в работе [5]. Термическую стабильность изучали на воздухе в интервале температур 300–1100 К (термоаналитическая система TGA/DSC-1/1600 HF) со скоростью нагрева 7 К/мин. Тепловое расширение керамических образцов исследовали dilatометрическим методом на кварцевом dilatометре (DIL 402PC) в интервале температур 300–1100 К со скоростью нагрева 5 К/мин.

Данные РФА показали, что все образцы кристаллизовались в тетрагональной сингонии (пр. гр. симм. $P4/mmm$), при этом твердые растворы с недостатком катионов бария $x = 0.10$ – 0.15 содержали незначительное количество примесей, а все дефицитные по неодиму образцы были гомогенны в пределах погрешности РФА. Параметры кристаллической структуры образцов незначительно уменьшались при создании дефицита катионов в обеих подрешетках (таблица) [5].

На ИК-спектрах поглощения (рис. 1) керамики в диапазоне частот 400–800 см^{-1} наблюдаются две полосы поглощения с экстремумами $\nu_1 = 535$ – 580 см^{-1} и $\nu_2 = 648$ – 664 см^{-1} , соответствующие валентным колебаниям связей металл–кислород в плоскостях $[(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu})\text{O}_2]$ (ν_1) и валентным колебаниям кислорода между этими плоскостями (ν_2), что отвечает структуре КСП. Создание дефицита катионов неодима и бария привело к смещению полос ν_1 в сторону больших частот, что говорит об увеличении энергии связей в плоскостях $[(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu})\text{O}_2]$ и согласуется с данными РФА.

Таблица – Перовскитный параметр (a_p) и величина потери массы (Δm) твердых растворов $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$

	$P4/mmm$	$x(\text{Nd}), P4/mmm$			$x(\text{Ba}), P4/mmm$		
x	0.00	0.05	0.10	0.15	0.05	0.10	0.15
$a_p, \text{\AA}$	3.896	3.886	3.888	3.885	3.885	3.885	3.889
$\Delta m, \%$	0.42	0.60	0.58	0.86	0.54	0.50	0.53

Индекс кислородной нестехиометрии образцов (δ) по сравнению с базовым составом $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ при создании дефицита катионов неодима увеличился до величин 0.46–0.52, а в случае дефицита ионов бария уменьшился до значений 0.17–0.27.

Пористость керамики при создании дефицита катионов неодима возросла до $\approx 8 \%$, а бария – незначительно уменьшилась (для базового состава $\Pi = 4,8 \%$). При этом состав $\text{NdBa}_{0.95}\text{Co}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ имел аномально низкое значение пористости ($\Pi < 1 \%$).

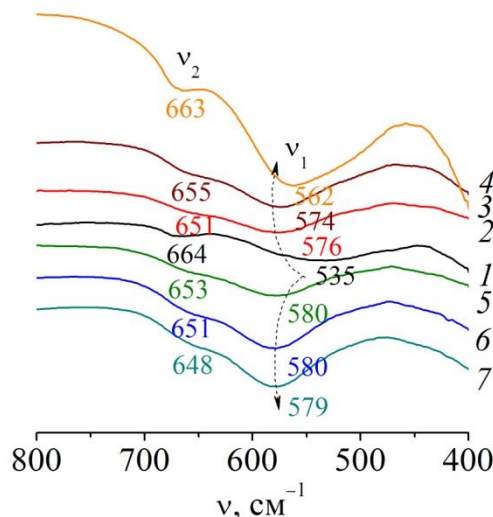


Рисунок 1 – ИК-спектры поглощения порошков
 $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$: $x = 0.00$ (1), 0.05 (2), 0.10 (3), 0.15 (4)
и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$: $x = 0.00$ (1), 0.05 (5), 0.10 (6), 0.15 (7)

Величины ОКР немонотонно изменялись в диапазонах: $D_{\text{Ш}} = 308\text{--}353$ нм, $D_{\text{В-Х}} = 407\text{--}561$ нм, $D_{\text{Р-Н}} = 322\text{--}420$ нм, проходя через минимум для составов с $x = 0.05\text{--}0.10$ (рис. 2, а–в).

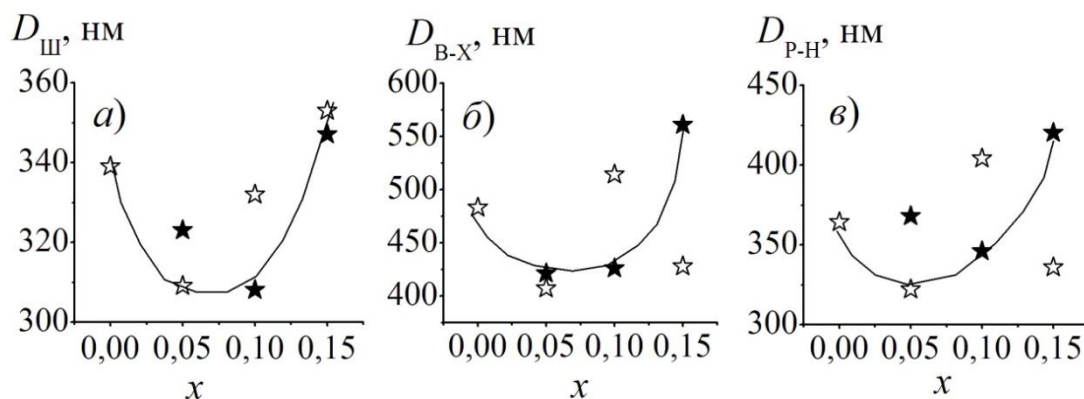


Рисунок 2 – Концентрационные зависимости ОКР,
рассчитанных по методам Шеррера (а), Вильямсона–Холла (б),
размера–напряжения (в) для перовскитов $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и
 $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$

Результаты термического анализа показали, что образцы были стабильны до температур $T^* = 690\text{--}700$ К, выше которых образцы теряли массу (Δm), что связано с выделением из них слабосвязанного кислорода и характерно для КСП. Величины T^* уменьшились при создании дефицита катионов неодима и бария, а величины Δm возросли (таблица), что говорит об облегчении выделения кислорода из образцов при создании дефицита катионов.

Коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) образцов $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{Nd}_{0.95}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ в интервале температур ($T = 350\text{--}1070\text{ K}$) был равен $15.8 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Сравнивая полученные значения, можно заключить, что небольшой дефицит катионов неодима (5 мол. %) не влияет на тепловое расширение керамики.

Таким образом, в работе получены катиондефицитные твердые растворы $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$, определено влияние дефицита катионов неодима и бария на их кристаллическую структуру, микроструктуру, термостабильность и тепловое расширение. Установлено, что недостаток катионов в обеих подрешетках уменьшает параметры кристаллической структуры и термическую стабильность керамики, сложным образом влияет на кислородную нестехиометрию, а небольшой дефицит катионов неодима (5 мол. %) не влияет на величину КЛТР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun C., Alonso J.A., Bian J. Recent Advances in Perovskite Type Oxides for Energy Conversion and Storage Applications // *Adv. Energy Mater.* – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 2000459.
2. F. Zheng, S. Pang. Progress in Developing $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ as an Oxygen Reduction Catalyst for Solid Oxide Fuel Cells // *Catalysts.* – 2023. – Vol. 13, № 9. – P. 1288.
3. Структура и электротранспортные свойства катиондефицитных производных слоистого феррокупрокобальтита неодима–бария / Е. А. Чижова [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы.* – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 339–348.
4. Current and further trajectories in designing functional materials for solid oxide electrochemical cells: A review of other reviews / S. Baratov [et al.] // *J. Energy Chem.* – 2024. – Vol. 94. – P. 302–331.
5. Журавлева Я.Ю. Электропроводность катион-дефицитных производных слоистого перовскита $\text{NdBaCo}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки.* – 2024. – Т. 15, № 1. – С. 165–170.
6. Клындюк А.И., Журавлева Я.Ю. Структура и физико-химические свойства твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ ($0.00 \leq x \leq 0.40$) // *Журнал неорганической химии.* – 2022. – Т. 67, № 12. – С. 1874–1880.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО
НАСЛАИВАНИЯ ПЛЕНОК CdS НА СТЕКЛОПЛАСТИНЫ**

Сульфидные полупроводниковые пленки в поликристаллическом структурном состоянии находят все большее применение в различных устройствах электронной техники, включая фоторезисторы видимого диапазона, пленочные фотоэлементы и другие опто- и микроэлектронные приборы [1]. Среди сульфидов второй группы CdS характеризуется повышенными значениями ширины запрещенной зоны (порядка 2,4 эВ) и подвижности основных носителей заряда (для электронов около $300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), что обуславливает прозрачность пленок в видимом диапазоне оптического спектра и невысокую инерционность соответствующих приборов.

Для разработки технологических процессов получения материалов на основе CdS важными особенностями являются достаточно высокая температура плавления (около 1750 °С) и летучесть неметаллического компонента, что осложняет управление газофазными процессами получения пленок. Вместе с тем малое значение произведения растворимости порядка 10^{-28} облегчает процессы получения пленок CdS с использованием доступных жидкофазных химических процессов, например гидрохимического осаждения (CBD) или ионного наплавления (SILD).

Целью работы было исследование процессов получения пленок CdS в рамках создания фотовольтаических гетероструктур на основе светопоглощающего слоя смешанного халькогенида (рисунок 1).

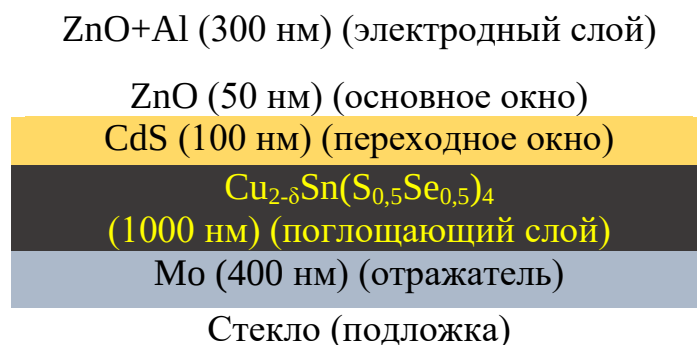


Рисунок 1 – Схема фотовольтаической гетероструктуры на основе полупроводников класса $A^{II}B^{VI}$

В составе приведенной гетероструктуры пленки CdS должны выполнить роль переходного слоя широкозонного полупроводника

(светопропускающего окна) и должны иметь толщину от 50 до 100 нм, ширину запрещенной зоны не менее 2,4 эВ и оптическое пропускание в видимом диапазоне не менее 50 %.

Ранее проведенные нами исследования процесса гидрохимического осаждения субмикронных пленок CdS определить технологические параметры, обеспечивающие получение пленок с вышеуказанными параметрами [1]. Однако существенным недостатком указанного метода является большой расход растворов-прекурсоров и достаточно узкий диапазон толщин получаемых пленок от 70 до 150 нм. В связи с этим очередным этапом наших исследований стали эксперименты по осаждению пленок CdS методом химического наслаивания при последовательной обработке подложек в растворах катионного и анионного прекурсоров с промежуточными промывками.

На основании анализа литературных данных в качестве исходных прекурсоров химического наслаивания пленок CdS были выбраны технологичные и недорогостоящие компоненты в виде раствора CdCl_2 и Na_2S [2]. Субмикронные пленочные образцы сульфида кадмия были получены на стеклянных подложках (ТУ 9464-012-5287-6859-2014), исходный размер которых составлял 78x26x1 мм.

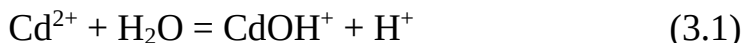
Маршрут формирования пленочных образцов включал операции обработки пластин в ацетоне в течение, кипячение подложек в дистиллированной воде; корректировка значений pH растворов-прекурсоров. Химическое наслаивание пленки CdS осуществлялось при последовательной обработке подложек в катионном прекурсор в течение 20 с, в дистиллированной воде в течение 40 с, в анионном прекурсор в течение 20 с, в дистиллированной воде в течение 40 с. Затем проводилась сушка образцов на воздухе, а в некоторых случаях образцы отжигались при температуре 300 °С. Количество циклов обработки в одном опыте составляло от 10 до 20.

В данном сообщении представлены результаты опытов по химическому наслаиванию пленок сульфида кадмия, которые отличались условиями получения, включая концентрацию ионов кадмия, режим промывки и количество циклов наслаивания. В целом, в рамках всех экспериментов концентрация ионов кадмия варьировалась от 0,02 до 0,1 моль/л. Концентрация использованного раствора сульфида натрия не варьировалась и составляла 0,1 моль/л.

После нанесения CdS образцы исследовались с использованием гравиметрии, спектрофотометрии, оптической микроскопии, а также омметрии.

Важнейшим параметром растворов-прекурсоров являлся их pH, значение которого контролировалось на различных этапах экспери-

мента. После приготовления катионного раствора - прекурсора его pH стабилизировался на уровне значений более 6, соответствующих слабокислой среде, обусловленной гидролизом иона Cd^{2+} в соответствии с уравнением (1):



Далее раствор корректировался хлороводородной кислотой до рабочего значения pH на уровне $4,8 \pm 0,1$ с целью подавления гидролиза и обеспечения наплаивания на поверхности стекла ионов Cd^{2+} , а не CdOH^+ . Значение pH анионного раствора-прекурсора после приготовления составляло $12,5 \pm 0,1$, что соответствовало значениям, необходимым для проведения химического наплаивания (рисунок 2).

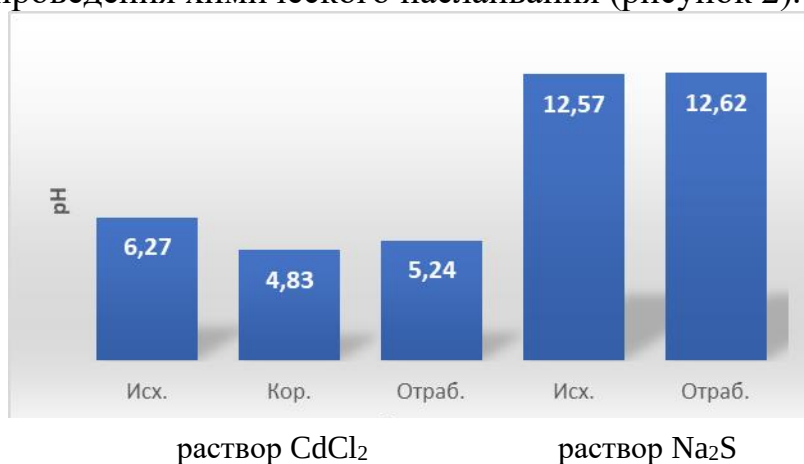


Рисунок 2 – Данные о кислотно-основном состоянии растворов-прекурсоров

После проведения наплаивания происходило подщелачивание катионного прекурсора с увеличением pH приблизительно на 0,5. Это наиболее вероятно связано с внесением некоторых количеств анионного щелочного прекурсора с высоким значением pH. Вместе с тем, pH анионного прекурсора после химического наплаивания также увеличивался, но обычно не более, чем на 0,1.

В наших экспериментах критично на равномерность осаждения CdS повлияла концентрация катионного прекурсора, а также режим промывки. Так, при использовании 0,1 М раствора CdCl_2 без замены воды на стадии промывки наблюдалось визуально фиксируемое локальное образование желтых частиц CdS вблизи подложки, особенно интенсивно вблизи ватер-линии (рисунок 3, а). Варьирование концентрации CdCl_2 от 0,1 до 0,02 моль/л показало, что наиболее интенсивное и достаточно равномерное осаждение CdS наблюдалось при концентрации катионного прекурсора на уровне 0,05 моль/л (рисунок 3, б).

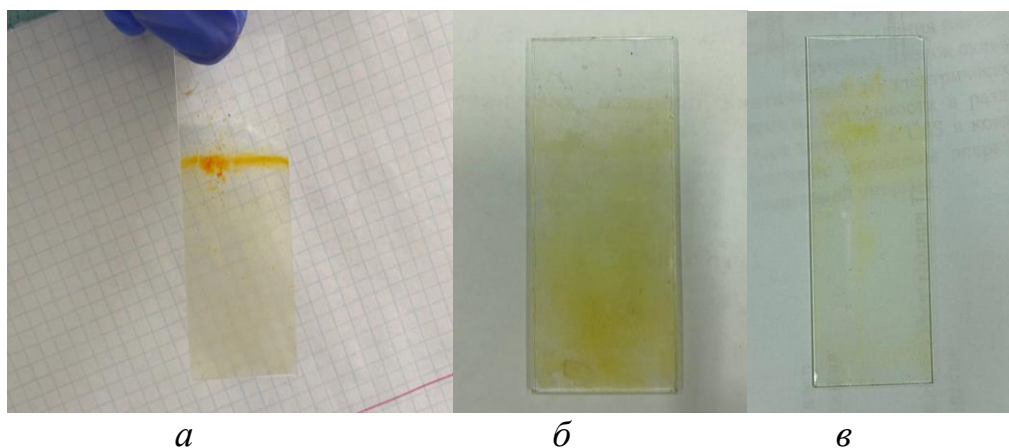


Рисунок 3 – Внешний вид стеклопластин после химического наплаивания CdS из 0,1 М (а), 0,05 (б) и 0,02 М (в) растворов CdCl_2

Спектрофотометрические измерения для полученных образцов показали, что осажденный CdS характеризуется повышенным значением ширины запрещенной зоны более 3 эВ, что может быть связано с наноструктурированным состоянием осажденного полупроводника. Электрофизические измерения свидетельствовали о высокоомном состоянии поверхности стеклопластин, которое существенно не изменялось после отжига образцов при температуре 300 °С.

Таким образом, на данном этапе исследований процесса химического наплаивания пленок халькогенидного широкозонного полупроводника CdS на поверхность стеклопластин можно рекомендовать использование 0,05 М раствора CdCl_2 и 0,1 М раствора Na_2S при несимметричной обработке подложек в растворах-прекурсорах и воде 20 и 40 с соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Богомазова, В. Д. Сидоров, К.Д Шуваева Технологические особенности гидрохимического осаждения субмикронных пленок CdS / Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2024: сборник научных статей межд. науч.-практ. конф., Курск, 9 октября 2024 г. – Курск: ЮЗГУ, 2024. – С. 112–115.
2. Veerathangam, K. Influence of SILAR deposition cycles in CdS quantum dot-sensitized solar cells / K. Veerathangam, Muthu Senthil Pandian, P. Ramasamy // J. Mater. Sci.: Mater. in Electronics. – 2018. – Ar. 10854-018-8721. – 7 p.

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ КОНВЕРСИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МОЛИБДАТНЫХ РАСТВОРОВ НА ГАЛЬВАНИЧЕСКИ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ

Черные декоративные покрытия на гальванически оцинкованных деталях приобретают все большую популярность по дизайнерским соображениям. Однако существующие на рынке композиции для черной пассивации на основе трехвалентного хрома достаточно дорогие и в последнее время труднодоступны. Известные черные хроматные конверсионные покрытия [1] характеризуются низкой коррозионной стойкостью и экологической опасностью.

Цель работы – разработка экологичных составов растворов и условий получения черных защитно-декоративных покрытий на гальваническом цинке. Соединения молибдена являются экологически значительно более безопасными, чем соединения хрома. В качестве соединения молибдена, используемого в растворах для получения конверсионных покрытий, выбран парамолибдат аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, который широко используется в нефтепромышленности, металлургии и сельском хозяйстве и является достаточно доступным. Черная окраска покрытий, получаемых из молибдатных растворов, может быть обусловлена образованием оксидов MoO_2 или Mo_4O_{11} [2].

В данной работе раствор для получения черных покрытий содержал 0,002 моль/л $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$. Для приготовления раствора использовался 4-хводный гидрат марки «ч.д.а.». При более высоком содержании парамолибдата аммония в растворе присутствовал нерастворимый осадок, что может быть связано с недостаточной чистотой реагента. Возможно, в результате длительного хранения часть вещества разложилась с образованием оксида молибдена MoO_3 , характеризующегося низкой растворимостью. Содержание молибдена в исследуемом растворе было значительно ниже, чем в работах [2, 3]. В раствор для получения покрытий добавлялись также ацетат натрия, щавелевая и лимонная кислота. В некоторые растворы вводились сульфат никеля и продукты гидролиза тетраэтоксисилана (ТЭОС). Для корректировки pH растворов использовали 20 % (масс.) NaOH или ледяную уксусную кислоту. Составы исследованных растворов для получения покрытий представлены в табл. Время получения покрытий, имеющих глубокий черный цвет, было достаточно большим и составляло 10 мин. Покрытия наносились на гальванически оцинкованную

сталь 3. Осаждение цинка толщиной 9 мкм производилось из аммиакатного электролита цинкования при плотности тока 2 А/дм².

Таблица 1 – Составы растворов для получения покрытий (моль/л)

№	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	CH ₃ COONa	H ₂ C ₂ O ₄	C ₆ H ₈ O ₇	ТЭОС	NiSO ₄	pH
1	0,002	0,11	0,015	–	–	0,006	2
2	0,0025	0,095	0,005	–	–	–	2
3	0,002	–	0,1	–	–	–	2
4	0,002	–	0,1	–	0,1	–	2
5	0,002	–	0,015	–	0,1	0,006	2
6	0,002	–	–	0,05	–	–	3

Покрытия, получаемые в растворах 1 и 2 с ацетатом натрия, имели темно-коричневую однородную окраску. В растворах 3 и 4 со щавелевой покрытия приобрели однородную молочно-серую окраску. Наиболее глубокий черный и однородный цвет имели покрытия, полученные в растворе 5 с добавлением сульфата никеля. В растворе 6 с лимонной кислотой покрытия получились серые неоднородные, поэтому защитные свойства их не исследовались.

Защитные свойства покрытий определялись электрохимическим методом в растворе 3 % (мас.) NaCl по следующей программе: 1) выдержка в растворе при отключенной ячейке 30 мин с регистрацией потенциала разомкнутой цепи (E_{pc}) в зависимости от времени; 2) снятие поляризационной кривой от начального потенциала –1,4 В со скоростью 1 мВ/с в анодном направлении до –0,8 В. Измерения проводились в трехэлектродной ячейке (вспомогательный Pt-электрод и насыщенный хлоридсеребряный электрод сравнения) с использованием потенциостата Р-40Х.

Потенциалы разомкнутой цепи образцов находились в пределах от –0,96 до –0,89 В, что характерно для цинка и гальванических цинковых покрытий в растворе NaCl. Стандартные потенциалы соединений молибдена значительно более положительны. Наименьшее значение стандартного потенциала (–0,2 В) приводится [5] для системы Mo³⁺/Mo. Очевидно, что формируемые черные покрытия, содержащие оксиды молибдена являются пористыми, так что стационарные потенциалы определяются редокс-процессами с участием цинка.

Поляризационные кривые оцинкованной стали с покрытиями, полученными в растворах 1-5 представлены на рис. В целом характер поляризационных кривых сложный и наличие пиков тока в области потенциалов от –1,15 до –0,9 В указывает на протекание окислительных процессов с компонентами конверсионного покрытия. Такими процессами могут быть процессы окисления оксидов молибдена. Химия молибдена очень сложная и возможно существование различных оксидов промежуточных между MoO₂ и MoO₃, одним из которых может быть упоминавшийся выше Mo₄O₁₁.

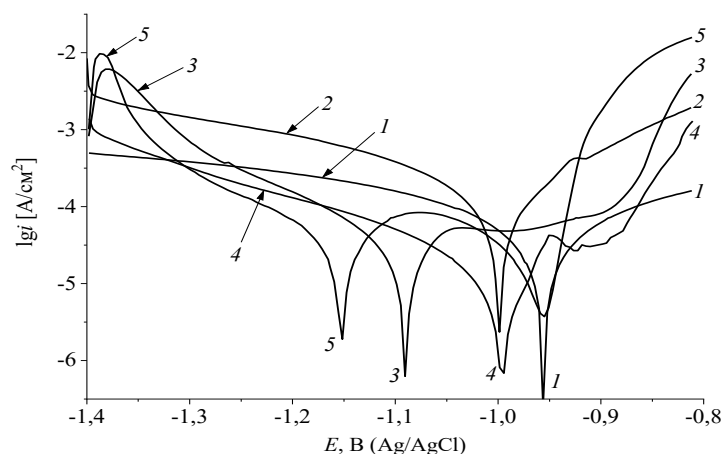


Рисунок – Поляризационные кривые оцинкованной стали с конверсионными покрытиями, полученными в растворах 1-5 (номера кривых на рис. соответствуют номерам растворов в табл.)

Для характеристики коррозионной стойкости примем величину катодного тока при потенциале $-1,2$ В предполагая протекание при этом потенциале преимущественно процесса восстановления кислорода. Восстановление кислорода как известно является основным катодным процессом электрохимической коррозии металлов в нейтральной среде. Наименьшие значения токов при данном потенциале и соответственно наилучшая коррозионная стойкость наблюдались для покрытий полученных в растворах 4 и 5, содержащих продукты гидролиза ТЭОС (наночастицы полисилоксанов). Наибольшие значения токов и наименьшая коррозионная стойкость были у покрытий, полученных из ацетатсодержащих растворов 1 и 2. Влияния добавок сульфата никеля на величину токов не выявлено.

Таким образом, можно заключить что введение продуктов гидролиза ТЭОС в раствор получения черных молибденсодержащих покрытий на гальванически оцинкованной стали приводит к повышению коррозионной устойчивости покрытий путем ингибирования катодного коррозионного процесса восстановления кислорода. Использование вместо ацетата натрия щавелевой кислоты в растворе для получения черных молибдатных покрытий на гальваническом цинке может увеличить коррозионную стойкость покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окулов, В. В. Цинкование. Техника и технология / В. В. Окулов; под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. – М.: Глобус, 2008. – 252 с.
2. Jahan, F. Characterization of molybdenum black coatings on zinc substrates / F. Jahan, B. E. Smith // Journal of Materials Science. – 1997. – Vol. 32, № 14. – P. 3869–3874.
3. Силов, Е. Н. Получение черных покрытий на гальваническом цинке из молибдатных растворов / Е. Н. Силов, В. Г. Матыс // Инно-

вационные материалы и технологии: материалы докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых. Минск, 9–11 января 2019 г. [Электронный ресурс] – Минск: БГТУ, 2019. – С. 260-262.

4. Черные защитно-декоративные молибденсодержащие покрытия на оцинкованной поверхности / В. Х. Алешина [и др] // Инновационные материалы и технологии: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. Минск, 9-21 января 2021 г. [Электронный ресурс] – Минск: БГТУ, 2021. – С. 174-176.

5. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1965. – 390 с.

УДК 544.63:620.193.27:621.793.1

В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук;
О.Г. Бобрович, доц., канд. физ.-мат. наук;
В.В. Поплавский, доц., канд. физ.-мат. наук
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ ЦЕРИЯ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА В РАСТВОРЕ ХЛОРИДА НАТРИЯ

Соединения церия широко исследуется как альтернатива хрома-там для пассивации алюминия и его сплавов обеспечивая высокие защитные свойства формируемых конверсионных покрытий [1–4].

В данной работе проведены исследования электрохимического поведения в растворе 3% NaCl образцов алюминия марки А7, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ВТ1-0, на поверхность которых был осажден церий методом вакуумного ионно-ассистированного осаждения [5] в количестве $10^{15} - 10^{16}$ ат/см². Также проведены исследования исходных материалов до осаждения церия.

Измерение электрохимических характеристик образцов проводилось с использованием потенциостата Р-40Х по следующей программе: 1) регистрация потенциала разомкнутой цепи в течение 60 мин; 2) регистрация поляризационной кривой в потенциодинамическом режиме (1 мВ/с) в диапазоне потенциалов от –1 до +0,5 В либо до достижения анодной плотности тока $\sim 0,08$ А/см².

Потенциал разомкнутой цепи электрода в коррозионной среде определяется протеканием анодного процесса окисления и катодного процесса восстановления. Поверхность алюминия и титана в обычных атмосферных условиях покрыта прочной оксидной пленкой. При погружении в раствор хлорида натрия поверхность образцов находится в

пассивном состоянии. В этом состоянии ток окисления металла очень мал и определяется ионной диффузией через оксидную пленку. Потенциал разомкнутой цепи в области пассивного состояния очень нестабильный, определяется процессами адсорбции и может варьироваться в широких пределах. В условиях, когда в растворе имеется растворенный кислород, потенциал разомкнутой цепи титана может неограниченно долго находиться в области пассивного состояния.

В растворе 3 % NaCl потенциал разомкнутой цепи для алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16Т потенциал разомкнутой цепи составлял $-0,75 - -0,7$ В (рис. 1, а), тогда как для титанового образца он изменялся в течение часа от $-0,35$ до $-0,05$ В.

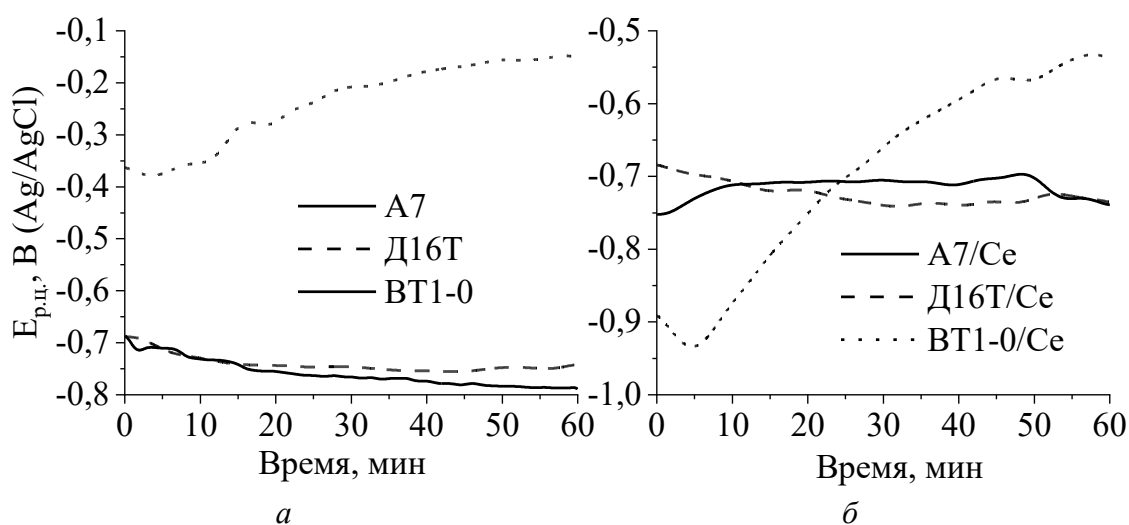


Рисунок 1 – Зависимость потенциала разомкнутой цепи от времени исходных образцов (а) и образцов с осажденным церием (б) в растворе 3% NaCl

После осаждения церия потенциал разомкнутой цепи образцов алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16Т практически не изменился и варьировался в течение часа в диапазоне от $-0,8$ до $-0,7$ В (рис. 1, б). Для титанового образца осаждение церия привело к значительному уменьшению потенциала разомкнутой цепи. За время выдержки образца в течение часа потенциал разомкнутой цепи плавно возрастал от $-0,9$ В до $-0,5$ В после незначительного уменьшения в первые 4 мин. Также следует отметить, что после осаждения церия потенциал разомкнутой цепи был нестабильным, на временных зависимостях наблюдались значительные осцилляции потенциала, особенно для образцов А7 и BT1-0.

Поляризационные кривые исходных образцов представлены на рис. 2, а. Наибольший потенциал коррозии (около $-0,35$ В) и наименьший ток коррозии (порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ А/см²) наблюдались для образца титана марки BT1-0. Для образцов алюминия А7 и алю-

миниевого сплава Д16Т потенциалы коррозии меньше, а токи коррозии больше (рис. 2, *а*). При этом для алюминия А7 потенциал коррозии (около $-0,6$ В) примерно на 100 мВ больше чем для алюминиевого сплава Д16Т ($-0,7$ В). Аналогично токи коррозии для алюминия ($\lg i_{\text{кор}} \sim -5,5$) примерно на порядок меньше, чем для сплава Д16Т ($\lg i_{\text{кор}} \sim -4,5$).

Поляризационные кривые образцов после осаждения церия представлены на рис. 2, *б*. На поляризационных кривых титанового образца ВТ1-0 после осаждения церия отмечались сильные осцилляции тока (может быть связано с изолирующим характером покрытия). Потенциал коррозии титанового образца после осаждения церия уменьшился с $-0,35$ В (рис. 2, *а*) до $-0,5$ В (рис. 2, *б*) а ток коррозии увеличился примерно на порядок.

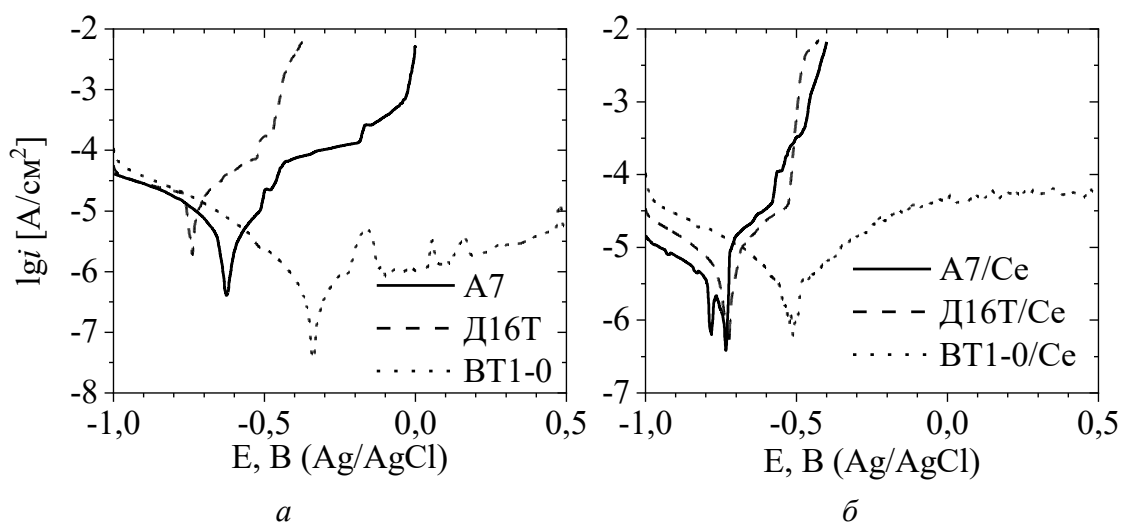


Рисунок 2 – Поляризационные кривые для исходных образцов (*а*) и образцов с осажденным церием (*б*) 3% NaCl; 1 мВ/с

Потенциалы коррозии образцов алюминия А7 и сплава Д16Т с осажденным церием примерно одинаковы и составляют $\sim -0,7$ В, т. е. такое же значение, как и для исходного сплава Д16Т (рис. 2, *а*). Таким образом, потенциал коррозии алюминиевого сплава Д16Т после осаждения церия на изменился, а алюминия А7 – увеличился примерно на 100 мВ. Что касается токов коррозии, то для алюминиевого сплава Д16Т осаждение церия приводит к небольшому уменьшению тока коррозии ($\lg i_{\text{кор}}$ уменьшилось примерно с $-4,5$ до -5). Для алюминия А7 ток коррозии практически не изменился.

На поляризационных кривых алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16Т можно отметить резкое возрастание анодного тока при некотором потенциале, которое связано с разрушением (пробоем) оксидной пленки (рис. 2). Этот потенциал так и называют – потенциал

пробоя. Так для исходного алюминия потенциал пробоя наблюдался при потенциале ~ 0 В, а для исходного сплава Д16Т – при потенциале $\sim -0,4$ В (рис. 2). Осаждение церия приводило к заметному снижению потенциала пробоя (рис. 2, б). Причем и у алюминия, и у сплава потенциал пробоя после осаждения церия составлял примерно $-0,5$ В.

Таким образом осаждение церия на поверхность алюминия приводит к снижению устойчивости оксидной пленки, которая обеспечивает пассивные свойства алюминия. Однако токи коррозии при этом особенно для сплава Д16Т немного уменьшаются, что можно связать в первую очередь со снижением скорости катодного процесса восстановления кислорода после осаждения церия, поскольку токи на катодных ветвях поляризационных кривых образцов А7 и Д16Т после осаждения церия значительно снижаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electrochemical corrosion resistance of aluminum alloy 6101 with cerium-based coatings in an alkaline environment / A. R. Khan [et al] // *Front. Chem.*, 2022. – Vol 10. – DOI: 10.3389/fchem.2022.1066958.
2. An Auger and XPS survey of cerium active corrosion protection for AA2024-T3 aluminum alloy A. Uhart [et al] // *Appl Surf Sci.* – 2016. – Vol. 390. – P. 751–759. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.08.170.
3. Becker, M. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys / M. Becker // *Corrosion Reviews.* – 2019. – Vol. 37, № 4. – P. 321–342. – DOI: 10.1515/corrrev-2019-0032.
4. Kumar, N. Effect of Plasma Surface Pretreatment on Ce^{3+} -Doped GPTMS- ZrO_2 Self-Healing Coatings on Aluminum Alloy / N. Kumar, A. Jyothirmayi, R. Subasri // *ISRN Corrosion.* – 2012. – DOI: 10.5402/2012/506560.
5. Поплавский, В. В. Установка для модификации электродных материалов ионными пучками / В. В. Поплавский, В. С. Леонов, Б.А. Бутылин // *Химия и химическая технология: республиканский межведомственный сборник.* – Минск: Высшая школа, 1984. – Вып. 19. – С. 52-54.

А.В. Тарасевич, мл. науч. сотр.;
И.М. Жарский, проф., канд. хим. наук;
В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук;
В.В. Орлицкий, студ. (БГТУ, Минск)

**ПОЛУЧЕНИЕ БЕСХРОМОВЫХ КОНВЕРСИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ ИЗ ЦИРКОНИЙ-
СОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ПРОДУКТАМИ КИСЛОТНОГО ГИДРОЛИЗА
ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА И ТЕТРАФТОРБОРАТОМ
АММОНИЯ**

Гальванически оцинкованные стальные изделия нашли широкое применение в различных областях промышленности. Как известно, без дополнительной обработки цинк быстро подвергается коррозионному разрушению вследствие того, что цинк является активным металлом. В связи с этим цинк принято пассивировать, причем коррозионная стойкость пассивных конверсионных покрытий определяет длительность защиты самих стальных изделий от коррозионного разрушения. Традиционно для пассивации цинковых покрытий применяют растворы на основе соединений шестивалентного хрома, образующие на поверхности цинкового покрытия толстые пассивные пленки с высокими защитными свойствами. Но вследствие высокой токсичности и канцерогенности ионов шестивалентного хрома в последнее время актуальна задача разработки составов бесхромовых растворов пассивации. Разработанные на данный момент неорганические бесхромовые покрытия, как правило, обладают рядом недостатков, не характерных хроматным конверсионным покрытиям, таких как отсутствие эффекта «самозалечивания» и низкая защитная способность. Для повышения защитных свойств покрытий ведутся исследования, направленные на повышение защитных свойств покрытий совместным использованием при приготовлении растворов пассивации органофункциональных силанов и неорганических солей. Нами изучались бесхромовые цирконийсодержащие растворы пассивации, модифицированные совместным введением в состав растворов продуктов кислотного гидролиза тетраэтоксисилана (ТЭОС) и тетрафторбората аммония.

Объектом исследования выступали стальные шайбы типа DIN 9021 с площадью обрабатываемой поверхности 2,5 см², которые подвергались предварительной подготовке, гальваническому цинкованию с последующей пассивацией цинкового покрытия в исследуемых растворах. Подготовка поверхности к цинкованию включала

обезжиривание протиркой ацетоном, травление (1–2 мин) в растворе состава: 120 г/л HCl, 10 г/л уротропин; активацию (0,5–1 мин) в растворе состава: 90 г/л H₂SO₄. Цинкование проводилось в аммонийно-хлоридном электролите с блескообразующими добавками Chemeta AC-45 при плотности тока 2 А/дм², осаждаемая толщина цинкового покрытия составляла 12 мкм. После цинкования проводилось осветление цинкового покрытия (2–5 с) в растворе 10 г/л HNO₃ с дальнейшей пассивацией (60 с) в исследуемых растворах.

Составы исследуемых цирконийсодержащих растворов пассивации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Компоненты цирконийсодержащих растворов пассивации оцинкованной стали

Компонент раствора:	Содержание компонентов раствора, моль/л					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
ZrO(NO ₃) ₂	0,01	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02
H ₂ O ₂ , мл/л	10	10	10	10	10	10
NH ₄ BF ₄	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
C ₂ H ₂ O ₄	–	–	–	0,1	0,1	–
pH раствора	2	3	3	3	3	3
Продукты гидролиза ТЭОС	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Гидролиз тетраэтоксисилана проводили непосредственно перед приготовлением растворов пассивации, при температуре 40 °С на водяной бане с использованием термостата «5 ОК-20/0, 05СИ-03». Раствор готовился в пробирке смешиванием изопропанола, ТЭОС, воды, уксусной кислоты и азотной кислоты в молярных соотношениях 20:5:80:3:1,25 соответственно.

Процесс проводился в следующей последовательности: сперва при комнатной температуре смешивали ТЭОС, изопропанол, уксусную кислоту и воду. После чего раствор помещали в термостат с уже нагретой до 40 °С водой на 4 часа. Проводилось периодическое встряхивание пробирки с раствором с интервалом в 1–2 ч. Далее в пробирку при активном перемешивании добавляли азотную кислоту, и полученный раствор дополнительно термостатировали на протяжении 15 минут. Полученный раствор, содержащий продукты гидролиза ТЭОС, использовался при приготовлении растворов пассивации объемом 200 мл. Таким образом, суммарное время гидролиза составляло 4 ч. 15 мин. Проведение гидролиза считалось успешным при получении однородного прозрачного или немного мутноватого раствора. В случае выпадения геля на дно пробирки или в случае пожелтения пробу не использовали. При приготовлении растворов пассивации продукты гидролиза ТЭОС добавлялись в раствор при перемешивании магнитной мешалкой после растворения всех неорганических компонентов раствора, затем доводился уровень pH.

Испытания защитных свойств изучаемых покрытий проводились выдержкой в 3%_{мас.} растворе NaCl. Результаты испытаний приведены на рисунке 1.

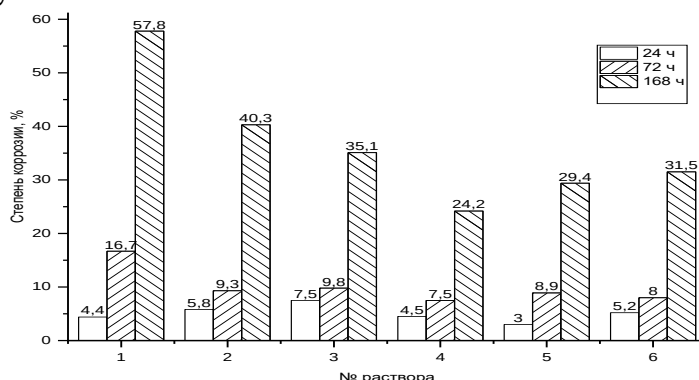


Рисунок 1 – Значения степени коррозии покрытий

Изучены электрохимические показатели коррозии при помощи исследования свойств изучаемых покрытий методом линейной вольт-амперометрии. По поляризационным кривым определялись потенциалы и токи коррозии, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Электрохимические показатели коррозии

№ раствора	$E_{корр}$, В	$lg i_{корр}$	$E_{рц}$, В	$E_{i=3.5}$
1	-1,01	-4,824	-1,011	-0,933
2	-1,019	-4,948	-1,014	-0,947
3	-1,025	-5,124	-1,022	-0,956
4	-1,034	-5,104	-1,027	-0,945
5	-1,039	-5,042	-1,031	-0,989
6	-1,047	-5,059	-1,035	-0,954

Дополнительно при помощи метода инверсионной вольтамперометрии определялась концентрация ионов цинка в растворе 3%_{мас.} NaCl спустя 168 ч. экспозиции в нем исследуемых образцов. На основании полученных данных рассчитан весовой показатель коррозии, данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Весовой показатель коррозии поверхности и концентрация растворенного цинка

Раствор	1	2	3	4	5	6
K , г/м ² ·сут	2,216	0,516	0,626	0,464	0,541	0,949
C_{z} , мг/л	185,172	121,02	89,24	66,57	77,21	135,71

Данные, полученные с помощью ресурсных испытаний в 3%_{мас.} NaCl и методом инверсионной вольтамперометрии, согласуются между собой, что может свидетельствовать о равномерном распределении очагов коррозии и отсутствии питтинговой коррозии. В результате испытаний установлено, что по электрохимическим параметрам коррозионного процесса лучшие исследуемые образцы (раствор №4) приближаются к хроматной пассивации, но уступают ей в защитной способности при ресурсных коррозионных испытаниях.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С УЛЬТРАДИСПЕРНЫМИ АЛМАЗАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В рамках настоящего исследования проведено изучение метода электролитического осаждения железных покрытий, модифицированных ультрадисперсными алмазами (УДА), на поверхность строгальных ножей, изготовленных из стали марки 60С2А. Результаты экспериментальных данных свидетельствуют о значительном увеличении микротвёрдости обработанной поверхности до значений 820 НV, что обуславливает улучшение механических и эксплуатационных характеристик инструмента. Применение данной технологии демонстрирует потенциал для повышения износостойкости и долговечности режущего инструмента.

При механической обработке древесных материалов экстрактивные вещества и диоксид кремния, присутствующие в структуре древесины, интенсифицируют процессы коррозии и механического износа стальных лезвий, используемых в режущих аппаратах [1]. Это приводит к снижению эксплуатационного ресурса фрезерных инструментов и уменьшению общей эффективности технологических процессов. В связи с этим, наряду с разработкой новых твердых сплавов и быстрорежущих сталей, значительное внимание уделяется методам повышения износостойкости и сохранения геометрической стабильности режущих кромок в условиях интенсивной эксплуатации [1, 2]. Одним из перспективных направлений является создание функциональных покрытий, включая нанокompозитные, многослойные, градиентные и многокомпонентные системы [1]. В частности, гальванические покрытия на основе Fe, Cr и Ni уже доказали свою эффективность в улучшении эксплуатационных характеристик инструментов [2]. Особый интерес представляет технология электролитического осаждения железа с ультрадисперсными алмазами (УДА), которая широко применяется в промышленности для создания покрытий с повышенной твёрдостью и износостойкостью [2].

Целью работы является разработка технологии электролитического нанесения железных покрытий, модифицированных ультрадисперсными алмазами, на строгальные ножи из стали 60С2А, а также исследование их морфологии и физико-механических свойств.

Для нанесения упрочняющих покрытий использовался метод гальванического осаждения. Образцы из закалённой стали 60С2А предварительно подвергались подготовке, включающей обезжиривание в 10%-ном растворе NaOH при температуре 60°C с последующей

промывкой горячей дистиллированной водой. Для удаления оксидных плёнок проводилась обработка 50%-ным раствором HCl с последующей промывкой дистиллированной водой.

Электролитическое осаждение осуществлялось из сульфатного электролита при температурах 20, 30 и 40°C и плотностях тока 5, 10, 15 и 20 А/дм². В качестве модифицирующих добавок использовались ультрадисперсные алмазы марок «Colin 450» (НПО ЗАО «Синта», Минск) и «УНМ 99» (Санкт-Петербург) с концентрацией в электролите 1–5 г/л. После завершения процесса осаждения образцы промывались горячей водой для удаления остатков электролита. Триботехнические свойства полученных покрытий исследовались методом скрейч-тестирования, что позволило оценить их износостойкость и адгезионную прочность.

Подготовленные образцы после завершения процессов обезжиривания, травления и электролитического осаждения подвергались сушке для удаления остаточной влаги. Высушенные образцы использовались для проведения комплексного анализа механических свойств и морфологии полученных покрытий. Исследование морфологии поверхности проводилось с использованием методов сканирующей электронной микроскопии (Рис. 1), что позволило визуализировать структуру покрытий и оценить их однородность.

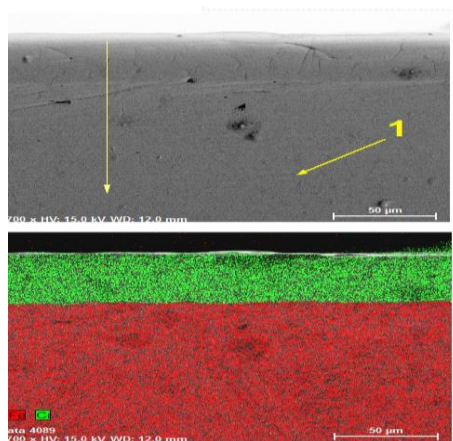


Рисунок 1 – Морфология электролитически осаждённого железа, полученного с использованием УДА марки «Colin 450» при плотности тока 15 А/дм²

Результаты проведённых исследований демонстрируют, что при плотности тока 15 А/дм² происходит формирование железной матрицы с повышенной механической прочностью, что подтверждается значениями микротвёрдости в диапазоне 450–570 НВ⁵⁰. Совокупная микротвёрдость композитного покрытия и подложки из стали 60С2А достигает 520–670 НВ²⁵. Введение ультрадисперсных алмазов (УДА) в концентрации 1 г/л в электролит приводит к существенному увели-

чению микротвёрдости покрытия до 820 HV²⁵. Указанный эффект обусловлен процессом инкорпорации частиц УДА в железную матрицу, что также вызывает увеличение микрошероховатости поверхности до значений 2,0–3,8 мкм (R_a).

Шероховатость покрытий, полученных из электролита без добавления УДА, варьируется в пределах 1,6–2,0 мкм (R_a). Добавление ультрадисперсных алмазов марок «УНМ 99» и «Colin 450» в состав электролита способствует увеличению шероховатости до 2,0–3,8 мкм (R_a). Полученные значения шероховатости соответствуют требованиям для последующих технологических операций, включая магнитоимпульсную обработку и нанесение ионно-плазменных покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов, таких как титан (Ti), молибден (Mo), цирконий (Zr) и хром (Cr).

Результаты скретч-тестирования свидетельствуют о высокой прочности Fe-УДА (Colin 450) покрытия: разрушение покрытия начинается после 1000 м истирания. Характер разрушения соответствует типу, характерному для процессов сжатия и растяжения. На основании визуального анализа установлено, что критическое разрушение покрытия наблюдается при 2500 м. Согласно данным скретч-теста, Fe-УДА покрытия демонстрируют высокую адгезионную прочность к подложке.

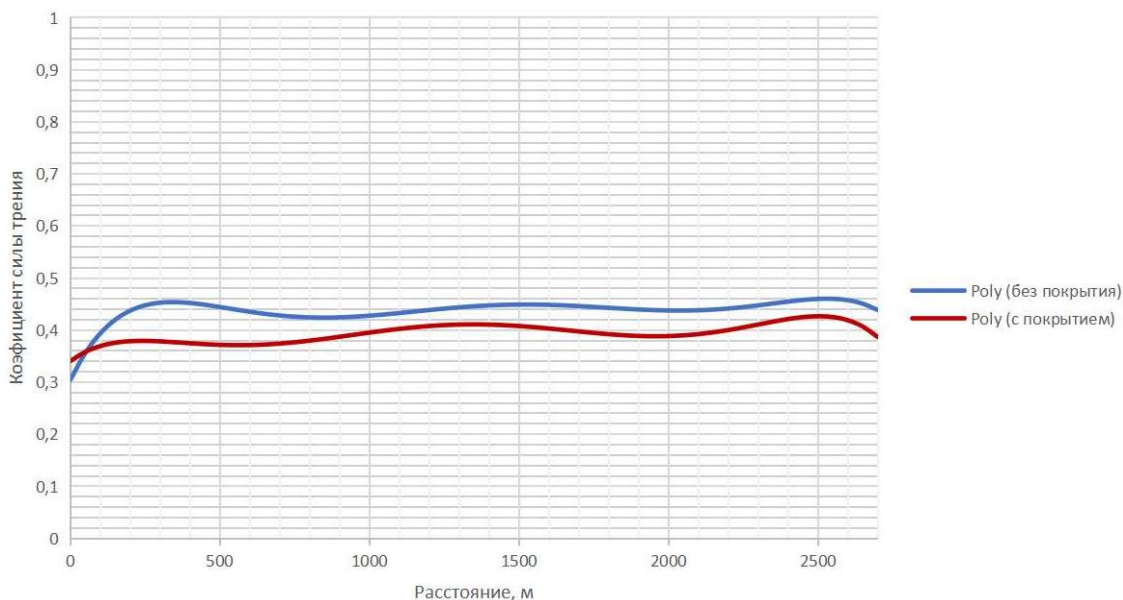


Рисунок 2 – Результаты исследования трибологических свойств (коэффициент трения) и износостойкости железных покрытий с ультрадисперсными алмазами (УДА) при плотности тока 15 А/дм², полученных из сульфатного электролита. Концентрация ультрадисперсных алмазов марки «Colin 450» в электролите составила 1 г/л

Fe-УДА покрытие, нанесённое на поверхность лезвий строгальных ножей, включает фазы α -Fe и Fe₃ C. Покрытие повторяет рельеф поверхности основы, что обеспечивает высокую степень адгезии.

Данные особенности структуры и морфологии покрытия подтверждают его устойчивость к механическим нагрузкам и износу, что делает его перспективным для применения в условиях повышенных эксплуатационных требований.

На основании визуальных наблюдений можно сделать вывод, что для данного покрытия разрушение начинается при 2500 м. Характер разрушения покрытия можно описать как скалывание [76]. С точки зрения скретч-теста Fe-УДА покрытия демонстрируют хорошую адгезию к подложке.

Внедрение технологии создания железных покрытий с использованием УДА в машиностроение, с последующим нанесением ионно-плазменных покрытий из нитридов тугоплавких металлов (таких как Ti, Mo, Zr, Cr и других), позволит снизить материалоёмкость и обеспечить импортозамещение в отраслях деревообработки и станкостроения.

Освоение в технологическом процессе предприятий концерна «Беллесбумпром» и других отраслях машиностроения технологии формирования композиционных железных покрытий с УДА с последующим нанесением ионно-плазменных слоев из нитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Zr, Cr и др.) для восстановления и упрочнения дереворежущего инструмента из дорогостоящих сталей обеспечит увеличение ресурса их работы, будет способствовать созданию новых материалов, а также решению задач снижения материалоемкости, импортозамещения в деревообрабатывающей промышленности, станкостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность применения TiN-, ZrN-, Ti-Zr-N- и Ti- покрытий на твердосплавных резцах при обработке ламинированных древесностружечных плит концевыми фрезами / А.А. Гришкевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. Минск, 2008. Вып. XVI. С. 52-54.
2. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник в 2-х томах Т.1. / М.А. Шлугер, Л.Д. Ток. – М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

Amir Waseem
Quaid-i-Azam University,
(Islamabad, Pakistan);

V.V. Zhyllinski
Belarusian State Technological University,
(Minsk, Belarus)

THE NEW MATERIALS BASED ON MXENES FOR DEVELOPING OF SUSTAINABLE ENERGY

This text discusses the growing need for renewable energy sources in light of the depletion of fossil fuels and their negative environmental impact. It highlights hydrogen energy as a promising alternative due to its high efficiency and low emissions. The text also explores the role of MXenes, a class of 2D materials, in advancing energy storage and conversion technologies. MXenes are particularly useful in lithium-ion batteries and supercapacitors, offering superior performance in energy density, charge/discharge rates, and cycling stability. Additionally, MXenes are explored for their potential in hydrogen evolution reactions, contributing to sustainable energy solutions.

In contemporary society, a substantial quantity of energy is required to facilitate the operation of diverse industries, transportation systems and agricultural practices. Traditional energy sources, such as petroleum and coal, remain prevalent for the purposes of energy generation; however, these resources are non-renewable and contribute to various environmental challenges, including pollution and climate change. There exists an imperative for clean, renewable and sustainable energy sources in the current era. Renewable energy is defined as energy derived from resources that naturally replenish over time, thereby meeting energy demands without jeopardizing the needs of future generations, while also avoiding detrimental impacts on the environment [1]. A wide array of renewable energy sources is encompassed by sustainable energy, including hydroelectric power, biomass, geothermal energy, wind power, wave energy, solar energy, and hydrogen energy [1].

A prominent paradigm in sustainable energy is the hydrogen economy, wherein hydrogen gas is utilized to meet the electrical energy requirements of nations, thereby decreasing reliance on fossil fuels. The high efficiency and minimal pollutant emissions associated with hydrogen and fuel cells offer significant potential for diminishing greenhouse gas emissions across various applications. The abundance of hydrogen, primarily found in water, is substantial; nevertheless, it necessitates an efficient process for extraction via water splitting. The fundamental aspects of energy conversion and storage hinge upon charge transfer and mass diffusion [1].

The rational design of structures tailored for practical use is facilitated by investigating the relationships between the structural properties and

functionalities of materials, along with comprehending charge transfer, mass diffusion, and the specific requirements of materials for specialized applications. Numerous inorganic functional materials, including innovative metals, oxides, sulfides, selenides, and their heterojunction nanomaterials with diverse morphologies, have been synthesized for high-performance energy-related devices. The rational design of materials and unique structural configurations (e.g., hollow, hierarchical, and heterojunction structures) has been shown to exhibit exceptional performance in photocatalytic water treatment, solar hydrogen evolution, solar cells, and energy storage applications (e.g., oxygen evolution reaction and oxygen reduction reaction electrocatalysts for fuel cells) [1].

A straightforward synthetic approach will be utilised to produce and exfoliate 2D materials (MXenes) and their composites for synergistic effects and a wide range of applications. Additionally, various MXene composites will be developed for applications in energy storage and enhancing supercapacitor performance [2].

The depletion of fossil fuels has heightened interest in renewable energy resources, with MXenes being used in energy storage applications. Lithium-ion batteries are characterized by their eco-friendliness, excellent cycling performance and high energy density, making them suitable for use in portable electronics. Graphite anodes exhibit limited energy storage capacity (330 mA h g^{-1}). In comparison, MXenes possess increased specific surface areas, electrical conductivity, lower circuit voltage and significantly reduced Ti_3C_2 diffusion barriers for Li-ions. Moreover, MXenes demonstrate superior gravimetric capacities relative to graphite. Monolayer MXenes exhibit superior capacity for Li ions compared to their multilayered counterparts, thus monolayers are favoured. However, functional group terminations can heighten diffusion barriers, thereby exerting a negative influence on storage capacities. The removal of -OH groups enhances storage capacity, while -O terminations also contribute positively. M_2X compounds with light transition metals and -O terminations are optimal for anodes in lithium-ion batteries. Additionally, MXenes have the capacity to be incorporated into non-lithium-ion batteries through the intercalation of various metallic ions, including Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , and Al^{3+} [2].

MXenes have been shown to be advantageous for supercapacitors due to their superior charge/discharge rates and prolonged cyclic stability in comparison to batteries. Multi-layered $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ exhibit varying behaviours in acidic versus basic electrolytes due to differences in charge-discharge mechanisms, with the HCl/LiF synthesis method being favoured as -O terminations enhance volumetric capacitance [3]. Acidic electrolyte conditions have been shown to further increase capacitance. Various strategies have been employed to mitigate aggregation, including vertically aligned liquid-crystallites, hydrogels, conductive particle decoration (e.g.,

NiO and Nb₂O₅), and interlayer spacers [4]. Notably, the Ti₃C₂T_x-polypyrrole nanocomposite demonstrates the highest reported volumetric capacitance to date [3]. Experimental findings of MXenes have also documented gravimetric and volumetric capacitances across different electrolytes. In energy conversion, for example, hydrogen evolution reactions, molecular hydrogen (i.e. carbon-free fuel) is produced by electrocatalysis. In the case of MXenes, the ideal Gibb's free energy can be achieved by adding transition metal adatoms for hydrogen adsorption [5].

In conclusion, the transition to renewable energy sources is essential to address the environmental challenges posed by traditional fossil fuels. Hydrogen energy, together with materials such as MXenes, offers promising solutions for sustainable energy production and storage. MXenes, with their unique properties, have exceptional potential to improve energy storage devices such as lithium-ion batteries and supercapacitors.

REFERECES

1. Lund H. Chapter 1 – Introduction. In: Lund H, editor. Renewable Energy Systems (2nd ed.). Boston: Academic Press; 2014. p. 1-14.
2. Ronchi R.M., Arantes J.T., Santos S.F. Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: Current status and perspectives. *Ceram Int.* 2019;45(15):18167-18188.
3. Zang X., Wang J., Qin Y., Wang T., He C., Shao Q., Zhu H., Cao N. Enhancing Capacitance Performance of Ti₃C₂T_x MXene as Electrode Materials of Supercapacitor: From Controlled Preparation to Composite Structure Construction. *Nano-Micro Lett.* 2020;12.
4. Ling C., Shi L., Ouyang Y., et al. Transition Metal-Promoted V₂CO₂ (MXenes): A New and Highly Active Catalyst for Hydrogen Evolution Reaction. *Adv. Sci.* 2016 Nov;3(11):1600180.
5. Xia Z., et al. Recent progress on synthesis, structure and electrocatalytic applications of MXenes. *FlatChem.* 2019;17:100129.

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ОБЩЕСТВА

Химия, как один из разделов естествознания в настоящее время претерпела коренные изменения. Однако сегодня ещё рано вести речь о коренном изменении в преподавании химии, правильнее будет вести речь о путях её обновления.

Строительство же нового должно опираться на прочный фундамент химического образования, заложенного ещё советской школой. И главной задачей в этом является сохранение и сочетание лучших традиций советской и национальной школы, с которыми связаны не только исторически. Национальная химическая школа сложилась в условиях советской системы образования в научных, профессорско-преподавательских коллективах университетов, обладая такими учеными-химиками, как Свиридов В.В., Капуцкий Ф.Н, Старобинец Г.Л., Тикавый В.Ф., Тищенко И.Г., Печковский В.В., Новиков Г.И., Безбородов М.А., Павлюченко М.М., Комаров В.С., Солдатов В.С..

Существовавшие ранее целевые программы развития народного хозяйства и химии – в частности, химическое образование подкреплялось государственной поддержкой – значительным финансированием развития образования и химии, особенно в 60-х – 70-х годах прошлого века. Так уже в начале 80-х Беларусь по производству химических волокон на душу населения вышла на уровень развитых стран мира (США, Япония, Германия), а по производству минеральных удобрений опережала эти страны.

Эти успехи являлись результатом соответствующей подготовки научных, технических преподавательских кадров, самой системы химического образования в стране. В Республике Беларусь до сих пор используются разработанные в то время большие по объему материала учебные программы и планы школьного и вузовского обучения.

На основе выстроенной десятилетиями стройной системы ориентиров и приоритетов была достигнута эффективность той системы образования и её единства, гармонично сочетавшей как фундаментальную, так и специальную подготовку школьников, учащихся, студентов; научных и педагогических кадров в области химии. Справедливости ради следует отметить, что тогда же были создана и основа материально-технической базы обучения.

Но современные представления и знания зависят не только от материальной поддержки государства, они в определенной степени сегодня опираются на профессиональную нравственность ведущих профессорско-преподавательских коллективов. В этом контексте рассмотрим совместную работу химических кафедр университетов по развитию и совершенствованию учебного процесса по общей и неорганической химии, теоретическим основам химии.

I. За последние 50 лет сложился системный подход к преподаванию химических дисциплин. Прежде всего, создан единый комплекс учебно-методической литературы для университетов и химико-технологических вузов, связанных единой учебно-методической логикой. В своё время (1989 г.) он был представлен на соискание Государственной премии Республики Беларусь. Это «Общая химия», «Основы общей химии», «Теоретические основы химии», «Общая химия в формулах, определениях, схемах», «Физические методы исследования в неорганической химии», «Задачи, вопросы и упражнения по общей и неорганической химии», «Практикумы по химии», «Полимерное строение неорганических соединений» и «Программированный контроль текущих знаний по общей химии».

Опираясь на фундаментальный закон естествознания, в данных пособиях и универсальных справочниках раскрывается содержание таких ступеней познания химии, как стехиометрия, химическая термодинамика, учение о химическом равновесии, максимальная работа химических реакций, химическая кинетика и катализ, учение о строении вещества, химия элементов и их соединений. Материал комплекса пособий рассматривается в свете Периодического закона и термодинамических представлений, раскрывающих многочисленные проблемы современной химии.

Изучение теории химических процессов и строения вещества потеряло бы свою внутреннюю логику без ознакомления с методами физико-химического исследования, которые связывают теорию с экспериментальной проверкой. Поэтому в пособии «Физические методы исследования в неорганической химии» изучение конкретных химических превращений связано со всем комплексом химических свойств и сопровождающих физических явлений.

Глубокое освоение сложного и разнообразного материала, его закрепление и выживаемость осуществляется только в процессе решения практических задач и упражнений, а также широкого использования методов программного контроля знаний.

Именно таким образом используемая система методически обоснованных подходов к изучению теоретических основ химии, об-

щей и неорганической химии студентами младших курсов удачно реализована в наших учебных пособиях.

Следующей части методической задачи, а именно, углубления и закрепления, приобретенных студентами знаний, отвечает учебное пособие «Задачи, вопросы и упражнения по общей и неорганической химии» основанное на широком привлечении структурной химии, некоторых разделов химической термодинамики и отчасти кинетики. Поскольку центр тяжести при решении задач приходится на внеаудиторные, то есть самостоятельные занятия студентов, в сборнике приведены схемы решения не только типичных, но и наиболее трудных оригинальных задач.

И, наконец, учебное пособие «Программированный контроль текущих знаний по общей химии» предназначено для индивидуальной работы студентов. Здесь использован программированный устный и письменный контроль по всем разделам химической теории, а также химии элементов и их соединений. Помимо типовых заданий в пособии представлены оригинальные задания, задания повышенной сложности.

Большинство пособий учебных комплексов завершаются большим набором справочных данных по всем разделам химии.

II. Перечисленное позволяет утверждать, что на химических кафедрах университетов был сформирован и единый методический подход на основе методической логики, опирающейся на общие научные закономерности в химии и на термодинамический подход к рассмотрению многочисленных проблем современной химии.

III. В целях совершенствования учебного процесса разработан комплекс видео материалов позволяющий в значительной мере активизировать не только учебный процесс, но и делающий изучаемый материал более доступным и наглядным. Этот материал систематизирован, представлен в лаконичной форме и оформлен в виде слайд-фильмов по 11 темам с сопроводительным текстом.

IV. Создана единая учебно-методическая документация, призванная реализовывать содержание образования в единстве с эффективной методикой преподавания.

V. Ведется работа по целенаправленному методическому обеспечению всего учебного процесса. Это прежде всего многочисленные внутривузовские издания.

VI. И, наконец, создана согласованная система подготовки специалистов-химиков включающая довузовское (спецклассы, лицеи, техникумы) – вузовское – поствузовский этапы образования. Эта си-

стема дополняется подготовительными курсами, факультетом повышения квалификации.

Следует отметить, что при сложившемся общем методическом подходе к обучению в университетах сложился и развивается индивидуальный подход профессорско-преподавательского состава к чтению лекций, к проведению занятий со студентами.

Всё перечисленное является свидетельством комплексного, целевого подхода к совершенствованию и организации учебного процесса в университете на базе выстроенной стройной системы ориентиров.

Глобальные изменения на постсоветском пространстве привели к существенному отставанию в информационности нашего общества, а химии – в частности. Современный этап развития химической науки в значительной мере связан с концепциями информатизации, интеллектуализации, интеграции. Эти концепции должны быть реализованы в информационных научных и прикладных исследованиях на основе новейших баз данных.

Традиционные источники химических знаний – книги, конспекты лекций, справочники уже не могут соперничать с современными информационными структурами.

I. Глобальные задачи. Необходимо создать универсальные программы хранения, поиска химической информации, которые бы включали

- структурные данные по химическим соединениям, как это начали делать, например, в ВИНТИ по координационным соединениям; причем доступ к этим данным представляется на некоммерческой основе;

- описание химических реакций (их типов, условий осуществления, классификацию);

- фактографические сведения о свойствах используемых соединений;

- библиографическое описание источников информации.

На базе таких новейших баз данных по химии и информации можно обеспечить возможность сложного логического поиска по всем элементам описания соединений.

II. Необходимо перейти от традиционного подхода к обучению (мел + доска + преподаватель), от информационно-обучающему подходу в химическом образовании – к обучающе-исследовательскому с помощью специально разработанных приемов вовлечения студентов в НИР (хороший пример – БГУ).

Необходимо организовать работу через Internet с глобальными базами научно-технической информации, с информационными системами ВИНТИ (Chemical Abstracts).

Решение уже этих задач требует не только централизованного финансирования по формированию единого информационного обеспечения, но и создания некоего координационного центра химического образования у нас в Республике Беларусь, задачами такого центра было бы воссоздание национальной программы развития химии и химического образования; обеспечение скорейшего создания базы химической информационной сети включающей

- разработку самой базы;
- создание инфраструктуры сети;
- создание информационной структуры для пользователей по дистанционному обучению (особенно студентов-заочников)
- координацию работы ВУЗов по подготовке студентов на базе эффективных систем информации.

В последние годы происходит снижение значимости химического образования, что вызвано рядом экономических и социальных факторов. Ухудшение материального обеспечения привело к резкому сокращению содержания химических дисциплин, прежде всего в школах причём при постоянном сокращении и числа часов. Химия стала крайне формализованным предметом, снизился и интерес к ней. Это породило необоснованную хемофобию в обществе, особенно в связи с экологическими проблемами у нас в Республике Беларусь.

Отсюда вытекают и новые задачи химического образования и те задачи, которые нам – преподавателям предстоит решить:

1. Реализовать неиспользованные резервы с целью преодоления противоречия между объемом химической информации и сокращением времени на химическое образование. Для этого необходимо усилить связи химических дисциплин с окружающей действительностью, более плодотворно использовать модульно-рейтинговую систему образования (особенно на старших курсах, как например это делают при изучении органической химии у нас). Усилить творческую деятельность всех участников учебного процесса. Использовать инновационные педагогические технологии для интенсификации процесса обучения.

2. Дальнейшая компьютеризация преподавания химии связаны с решением многочисленных задач химической термодинамики, с использованием различных методов расчета, с минимизацией энергии Гиббса для расчета термодинамических равновесий, с оптимизацией эксперимента, математическим моделированием и т.д. Предстоит со-

здать программы-тренажеры для слабоподготовленных студентов, следует обеспечить студентов методической информацией на электронных носителях и т. д.

3. Необходимо формировать и новые спецкурсы, например, по компьютерной и математической химии, новым методам осуществления химических реакций (в парообразном состоянии, криохимия, сверхвысокие давления и др.), по компьютерному молекулярному моделированию, по конструированию лекарственных препаратов, по некоторым классам физиологически активных веществ, по химии и информатике или же создание «элитно»-специальных курсов для наиболее способной, одаренной молодежи.

4. Актуальной в наше время стала работа по переподготовке специалистов народного хозяйства, которую следует проводить и как путем создания учебно-научно-производственных центров, так и расширением работы факультетов по повышению квалификации.

УДК 621.357

И.А. Черник, преп.-стажер;
И.И. Курило, зав. кафедрой ФКиАХ, канд. хим. наук;
А.А. Черник, зав. кафедрой ХТЭХПиМЭТ, канд. хим. наук
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗО

Электрохимический сплав никель-железо может быть применен в качестве альтернативы никелевого покрытия, что позволяет значительно удешевить процесс получения коррозионно-стойких покрытий с отличными физико-механическими свойствами. Свойства таких сплавов в первую очередь определяются составом сплава. Однако получение сплавов никель-железо осложнено аномальным соосаждением.

Применение нестационарных токовых нагрузок при осаждении гальванических покрытий позволяет существенно увеличить число переменных факторов и расширить возможности управления свойствами получаемых покрытий. В результате исследований нами установлено, что вариация параметров импульсного тока позволяет получать качественные блестящие покрытия сплавом железо-никель с различным содержанием компонентов. При этом с ростом плотности тока в импульсе увеличивается твердость покрытий. Кроме того, на

рост твердости покрытия оказывает влияние длительность времени паузы. Это может быть обусловлено образованием на поверхности катода большего числа новых кристаллических зародышей. Если же увеличить время импульса, то это приводит к уменьшению твердости. Все эти факторы в первую очередь связаны с кинетикой катодного процесса электрокристаллизации и составом получаемого сплава.

Установлено, что с ростом времени импульса наблюдается существенное увеличение выхода по току сплава с 20 до почти 90 % при паузе в 2 мс. Это обусловлено высоким перенапряжением разряда ионов железа и никеля. Разряд этих ионов лимитируется электрохимической стадией. При увеличении длительности импульса прикатодное пространство обедняется ионами водорода и, как следствие, выделение водорода будет лимитироваться скоростью диффузии. Соответственно это приведет к тому, что выход по току сплава будет возрастать.

Экспериментальным путем установлено, что содержание никеля в сплаве уменьшается с ростом времени импульса и времени паузы. Сопоставляя эти данные с данными по твердости покрытия, можно сделать вывод, что увеличение твердости покрытий также обусловлено ростом содержания железа в сплаве.

Анализ внешнего вида полученных покрытий и условий их осаждения, позволяет сделать следующие выводы: с ростом катодного тока наблюдается ухудшение качества покрытия и уменьшение блеска. Аналогичные результаты наблюдаются с уменьшением времени паузы. Проведение электролиза при плотности тока 5 А/дм^2 и времени паузы 1 мс приводит к получению зеркально-блестящих осадков, а изменяя время импульса, содержание никеля в сплаве можно регулировать в широком интервале.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАТРИЯ
В СЛОИСТОМ КОБАЛЬТИТЕ НАТРИЯ $\text{Na}_{0.55}\text{CoO}_2$
РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

Целью работы является определение реального содержания натрия (x_{Na}) и среднюю степень окисления кобальта (Co^{+Z}) в кобальтитатах натрия $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($M = \text{Cr, Ni, Zn, Bi, W}$) методами иодиметрического и обратного потенциометрического титрования, а также спектрофотометрически. Согласно [1, 2] кислородная подрешетка слоистого кобальтита Na_xCoO_2 содержит незначительное количество вакансий, поэтому степень окисления кобальта в этих фазах контролируется только содержанием в них натрия (x_{Na}).

Среднюю степень окисления кобальта (Co^{+Z}) в керамических образцах слоистого кобальтита натрия Na_xCoO_2 определяли иодометрически, растворяя навеску порошка Na_xCoO_2 в концентрированной соляной кислоте (HCl) в присутствии иодида калия KI в инертной среде (газообразный N_2) [3]. Согласно результатам иодометрии, конечный состав слоистого кобальтита натрия соответствовал формуле $\text{Na}_{0.55}\text{CoO}_2$, а средняя степень окисления кобальта Co^{+Z} в нем составила 3.45.

Содержание кобальта в средней степени окисления и реальное содержание натрия в $\text{Na}_x\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($M = \text{Cr, Ni, Zn, Bi, W}$) также определяли по методике обратного потенциометрического титрования [4]. Навески порошков кобальтита $\text{Na}_x\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ растворяли в концентрированной соляной кислоте (HCl), затем к полученному раствору добавляли избыток цитратно-аммонийного буферного маскировочного раствора, 25 % водный раствор NH_3 (до значения $\text{pH} = 10$) и фиксированный объем фиксального раствора $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Полученный раствор титровали стандартным раствором CoSO_4 при помощи TitroLine easy (SI Analytics SCHOTT).

Содержание натрия в полученных образцах (x_{Na}), определенное методом обратной потенциометрии, составляло около 0.55 для всех исследованных образцов (табл. 1). Средняя степень окисления кобальта в слоистых кобальтитах $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($M = \text{Cr, Co, Ni, Zn, W, Bi}$) изменялась в пределах 3.17–3.61 (табл. 1), увеличиваясь при замещении акцепторного характера (Ni или Zn вместо Co) и уменьшение при замещении донорного характера (W или Bi вместо Co).

Общее содержание кобальта в слоистых кобальтитах натрия $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ также определяли спектрофотометрически в виде тиоционатного комплекса $[\text{Co}(\text{SCN})_4]^{2-}$ и комплекса кобальта с ЭДТА $[\text{CoY}]^-$ [5]. В первом случае, к навескам слоистого кобальтита добавляли раствор H_2SO_4 (1:1) и полученные смеси подогревали до их полного растворения, далее к полученным растворам добавляли фиксированные объемы 50 мас. % раствора NH_4SCN и ацетона. Оптическую плотность измеряли при $\lambda = 625$ нм ($\varepsilon_{625} = 19100$ л/(моль·см)) (рис. 1) и по результатам измерений рассчитывали содержание натрия (x_{Na}) и среднюю степень окисления кобальта (Co^{+Z}) в керамических образцах $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$.

Таблица 1 – Содержание натрия (x_{Na}) и средняя степень окисления кобальта (Co^{+Z}) в образцах слоистых кобальтитов $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($M = \text{Cr, Co, Ni, Zn, W, Bi}$) определенное различными методами

M	Обратное потенциометрическое титрование		Спектрофотометрия комплекса кобальта $[\text{Co}(\text{SCN})_4]^{2-}$			Спектрофотометрия комплекса кобальта $[\text{CoY}]^-$
	x_{Na}	Co^{+Z}	x_{Na}	Co^{+Z}	x_{Na}	Co^{+Z}
Cr	0.553	3.50	0.554	3.50	0.555	3.50
Co	0.545	3.45	0.549	3.45	0.548	3.45
Ni	0.554	3.61	0.553	3.61	0.554	3.61
Zn	0.548	3.61	0.551	3.61	0.549	3.61
W	0.551	3.17	0.555	3.16	0.557	3.17
Bi	0.553	3.28	0.552	3.28	0.553	3.28

Во втором случае, к навескам керамических образцов $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ добавляли фиксированные объемы 0.25 М раствора ЭДТА и 2М раствора H_2SO_4 и полученные смеси подогревали до полного растворения, затем к полученному раствору добавляли навеску сухой соли KIO_4 (для окисления Co^{2+} до Co^{3+}). Оптическую плотность полученного раствора измеряли при $\lambda = 550$ нм ($\varepsilon_{550} = 294$ л/(моль·см)) и по результатам измерений рассчитывали содержание натрия (x_{Na}) в образцах $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$. Содержание натрия в полученных образцах (x_{Na}), определенное спектрофотометрическими методами также составляло около 0.55 для всех исследованных образцов (табл. 1). Средняя степень окисления кобальта в слоистых кобальтитах $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($M = \text{Cr, Co, Ni, Zn, W, Bi}$) изменялась в пределах 3.17–3.61 (табл. 1), также увеличиваясь при замещении кобальта никелем или цинком и уменьшаясь при замещении кобальта вольфрамом или висмутом.

Таким образом, в работе показано, что определение средней степени окисления ионов кобальта для слоистых кобальтитов натрия при помощи иодометрического и обратного потенциометрического

титрования, а также спектрофотометрическими методами позволило определить конечный состав слоистых кобальтитов $\text{Na}_{0.55}\text{Co}_{0.90}\text{M}_{0.10}\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Cr}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Bi}, \text{W}$), а результаты обеих методик хорошо согласуются друг с другом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Viciu L., Huang Q., Cava R.J. Stoichiometric oxygen content in Na_xCoO_2 . // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73. – 212107.
2. Joo W., Yoo H.-I. Point defect structure of $\gamma\text{-Na}_x\text{CoO}_2$ // Solid State Ion. – 2018. – Vol. 314. – 74–80.
3. Клындюк А.И., Красуцкая Н.С., Дятлова Е.М. Влияние температуры спекания на свойства керамики Na_xCoO_2 // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 96–102.
4. Пятницкий, И.В. Аналитическая химия кобальта / И.В. Пятницкий – М. Наука, 1965. – 292 с.
5. Sopicka-Lizer, M. Assessment of Co(II), Co(III) and Co(IV) content in thermoelectric cobaltites / M. Sopicka-Lizer [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials – 2009. – Vol. 54, № 4. – P. 881–888.

УДК 546.46+621.793.3+620.193+666.11.01

И.И. Курило, доц., зав. кафедрой ФКиАХ, канд. хим. наук;
М.В. Дяденко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
А.В. Поспелов, вед. инж. (ООО «Футберг»);
Е.О. Богдан, доц., канд. техн. наук;
А.С. Глинский, стажер мл. науч. сотр. (БГТУ, г. Минск)

КОМПОЗИЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО БИОСТЕКЛАМИ ПОЛИЛАКТИДА НА ФОСФАТИРОВАННЫХ СПЛАВАХ МАГНИЯ

В настоящее время в травматологии и ортопедии весьма перспективно применение биоразлагаемых металлических имплантатов, среди которых наибольший интерес представляют магний и его сплавы благодаря их высокой биосовместимости, низкой плотности и механическим свойствам, сходным со свойствами нативной кости. Однако, несмотря на огромный потенциал магния и его сплавов как материала для получения биоразлагаемых имплантатов, существует ряд нерешенных вопросов, ограничивающих их широкое применение: быстрая и неконтролируемая деградация в биологических средах, сопровождающаяся высвобождением водорода, а также неоднородная степень разрушения с образованием локальных дефектов. Вышеопи-

санные процессы могут оказывать негативное влияние на ткани организма и приводить к нарушению механической целостности имплантата до того, как произойдет заживление костной ткани [1].

Одним из способов повышения коррозионной устойчивости магния и его сплавов является нанесение на их поверхность кальций-фосфатных, биополимерных и других покрытий. Покрытия на основе фосфатов кальция характеризуются высоким биологическим сродством к нативной кости, способствуют повышению биоактивности имплантата, обеспечивают его прочное соединение с костной тканью и существенно улучшают процесс остеоинтеграции. Биополимерные покрытия не только демонстрируют механические свойства, сравнимые с мягкими биологическими тканями, но и поддерживают рост клеток, обеспечивают биосовместимость и контролируемую биодеградацию. Однако в ряде работ отмечается, что применение полимерных покрытий в чистом виде является проблематичным, поскольку они могут восприниматься организмом как чужеродный материал и способны вызывать аллергические реакции, нежелательные канцерогенные, иммунологические и бактериологические эффекты. Поэтому целесообразным является введение в состав полимерных материалов биоактивных наполнителей, например, биоактивных стекол, способных стимулировать остеогенез в местах контакта.

Целью работы являлось получение на фосфатированном сплаве магния WE43 полимерных композиционных покрытий на основе полилактида, модифицированного полидисперсными частицами биостекла.

На основании ранее проведенных нами исследований [2] разработаны составы растворов и режимы химического фосфатирования легированного редкоземельными элементами сплава магния WE43. Установлено, что покрытия на основе гидрофосфата кальция обеспечивают наиболее высокий защитный эффект (88–95 %) и позволяют снизить скорость коррозии сплава WE43 в физиологическом растворе Хэнка в 5–18 раз в зависимости от длительности и температуры фосфатирования.

Для получения композиционных покрытий готовили 5 % раствор полилактида (PLA) в хлороформе, в который вводили биоактивные стекла в виде порошка в количестве 1, 3 и 6 мас. %. Перед нанесением покрытий приготовленную суспензию диспергировали в ультразвуковом гомогенизаторе UP 200 Ht. Обработку проводили при частоте ультразвука 26 кГц выходной мощностью 20 Вт. Покрытия наносили путем окунания предварительно фосфатированных образцов сплава магния в приготовленную суспензию. Скорость извлечения образцов из суспензии составляла 60 мм/мин. Сушку образцов с нане-

сенным покрытием PLA осуществляли в течении 48 ч при комнатных условиях.

В качестве наполнителя при получении композиционных полилактидных покрытий использовали порошки биостекла, синтезированных на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$. Установлено, что введение в систему оксида MgO в количестве 3.5–8.5 мас. %, ZnO и SrO – 3.5–6.0 мас. % обеспечивают требуемый уровень технологических и физико-химических свойств синтезируемым биоактивными стеклами. Также использовались стекла, модифицированные оксидами титана, ниобия и церия, которые, согласно литературным данным, обладают не только биоцидными свойствами, но и обеспечивают материалу биоактивность.

Микроструктуру синтезированных покрытий изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 5610 LV с системой химического анализа EDX JED 2201 JEOL (Япония).

На рис. 1 представлены СЭМ изображения сформированного фосфатного покрытия с нанесенным слоем полилактида (а) и композиционного покрытия полилактид–частицы биостекла (б). Установлено, что формирование слоя полилактида на поверхности образца приводит к заполнению пор и межзеренного пространства конверсионного слоя гидрофосфата кальция.

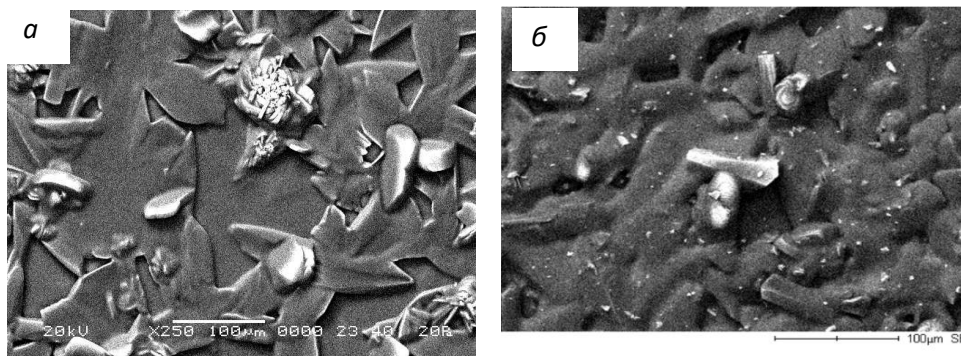


Рисунок 1 – СЭМ изображение поверхности фосфатированного сплава магния WE43 после нанесения слоя полилактида (а) и композиционного покрытия полилактид–частицы биостекла (б)

При увеличении содержания частиц биостекла от 1 до 6 мас. % в растворе полилактида наблюдается формирование более шероховатых и неоднородных покрытий, а также агломерация частиц биостекла. Установлено, что толщина композиционных покрытий полилактид–частицы биостекла составляет около 20 мкм. По мере повышения содержания наполнителя неоднородность покрытий увеличивается, при этом наиболее качественные покрытия формируются при окунании

фосфатированных образцов сплава магния в раствор полилактида, содержащий 3 мас. % частиц биостекла.

Электрохимические исследования коррозии полученных образцов проводили на потенциостате / гальваностате AUTOLAB PGSTAT 302, оснащённом модулем импеданса. Рабочим электродом служили фосфатированные образцы сплава WE43, в качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод, противоэлектродом являлся платиновый точечный электрод.

Согласно полученной поляризационной зависимости (рис. 2а), плотность тока коррозии фосфатированного сплава с нанесённым слоем полилактида составляет $1.12 \cdot 10^{-7}$ А/см², что свидетельствует о снижении скорости коррозии в растворе Хэнка полученных образцов практически в 18 раз по сравнению с фосфатированными образцами. Это связано с тем, что полилактид заполняет дефектную поверхность конверсионного фосфатного слоя, ограничивая контакт коррозионной среды с металлической подложкой.

Как видно из данных рис. 2б, модификация полилактидной матрицы частицами биостекла приводит к смещению потенциала коррозии образца в область электроотрицательных значений на 250 мВ и незначительному снижению защитных свойств покрытий.

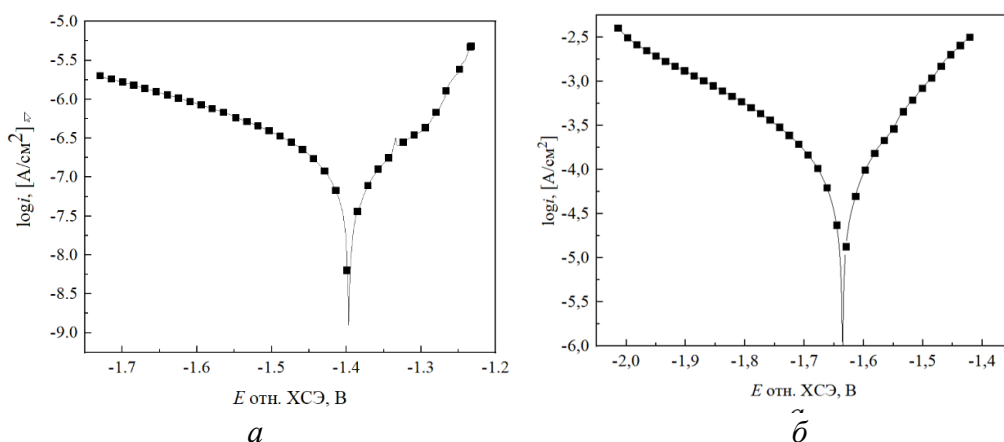


Рисунок 2 – Поляризационные кривые в растворе Хэнка фосфатированного образца сплава магния с нанесённым полилактидным покрытием (а) и композиционным покрытием полилактид–частицы биостекла (б)

Возможно, частицы биостекла приводят к образованию дефектов в полилактидной матрице или контактируя с коррозионной средой оказывают влияние на кислотность среды, изменяя тем самым потенциал коррозии.

Таким образом, модификация полилактидного покрытия дисперсными частицами синтезированных биостекол приводит с одной стороны к незначительному снижению его защитных свойств, а с дру-

гой – к повышению шероховатости и неоднородности покрытия, что будет положительно влиять на процесс остеоинтеграции костной ткани.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 2.2.10 ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» подпрограммы «Синтез и направленное модифицирование регуляторов биопроцессов» на 2024–2025 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maier P., Hort N. Magnesium Alloys for Biomedical Applications / P. Maier // Magnesium Biomaterials. – 2020 – Vol. 10. – P. 2–4.
2. Поспелов А.В., Ширвель А.А., Касач А.А., Богдан Е.О., Курило И.И. Получение биосовместимых конверсионных покрытий на магниевом сплаве медицинского назначения // Медэлектроника-2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.- техн. конф., Минск, 5-6 декабря 2024 года. – Минск: БГУИР, 2024. – С. 230–233.

УДК 546.39 : 66.081

А.Р. Цыганов, академик, д-р с.-х. наук;
А.С. Панасюгин, гл. науч. сотр., канд. хим. наук;
И.И. Курило, зав. кафедрой, канд. хим. наук;
Н.П. Машерова, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск);
Н.Д. Павловский, доц., канд. хим. наук (ГГМУ, г. Гродно)

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОЙ АКТИВАЦИИ НА КИНЕТИКУ СОРБЦИИ ПАРОВ АЦЕТОНА, ЭТИЛАЦЕТАТА И ИЗОПРОПАНОЛА НА ПРИРОДНОМ И МОДИФИЦИРОВАННОМ ШУНГИТЕ

Избыточное содержание летучих органических веществ в атмосфере является актуальной экологической проблемой. В настоящее время очистка отходящих газов от паров органических растворителей путем адсорбции на природных сорбентах, в частности шунгитовых пород, представляется весьма перспективной.

Известно, что кислотная обработка является одним из эффективных способов модифицирования природных сорбентов. Кислотная обработка приводит к увеличению удельной поверхности, сорбционного объема, изменению кислотно-основных свойств поверхности, что в конечном итоге приводит к более эффективной работе сорбента.

Целью данной работы явилось исследование закономерностей сорбции паров ацетона, этилацетата и изопропанола природном и кислотно активированном шунгите.

Методы исследований

Объектом исследования являлся природный шунгит Зажогинского месторождения (Россия, Карелия). Активацию природного сорбента (фракция 2-3 мм) проводили 3,7 М раствором H_3PO_4 в соотношении твердая фаза : кислота 1 : 10 при непрерывном перемешивании и температуре 95 °С в течение 4 часов. Полученный образец промывали дистиллированной водой до $pH = 5,1$ и высушивали при температуре 100°С до постоянной массы [1].

Кинетику сорбции паров изопропанола изучали методом прямого взвешивания на соответствующей установке. В работе использовались также методы рентгенофазового и адсорбционно-структурного анализов. Для определения удельной поверхности образцов использовали экспресс-анализатор Micromeritics 2200.

Изучение фазового состава материалов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Для анализа элементного состава образцов применяли сканирующий электронный микроскоп Vega II LMU с микроанализатором Inca Energy. Взвешивание образцов производили на электронных весах OHAUS Explorer Pro. Изотермы адсорбции снимали на установке с микровесами (весы Мак-Бена-Бакра).

Результаты и их обсуждение

Из данных рентгенофазового анализа, видно, что на спектре РФА активированного фосфорной кислотой шунгита отсутствует кристаллографическая фаза мусковита $(K_2(Al_{3.74}Fe_{0.26})(Si_6Al_2O_{20})(OH)_4)$, наблюдаемая для природного минерала (рис.1).

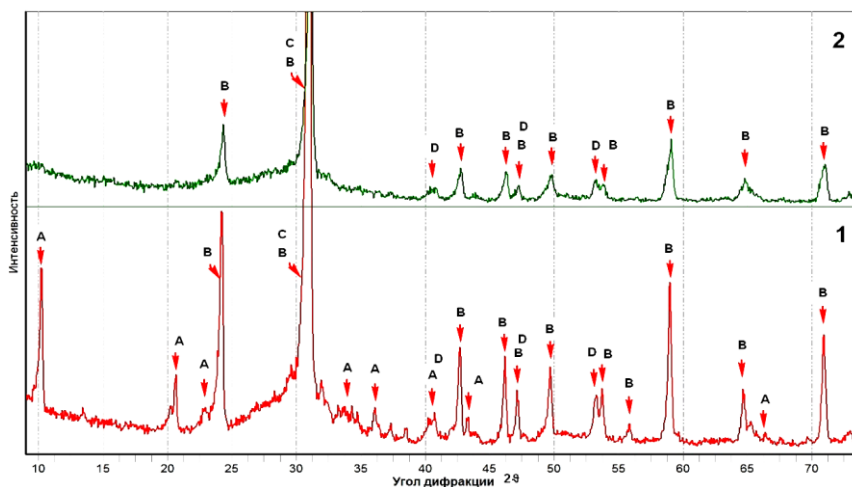
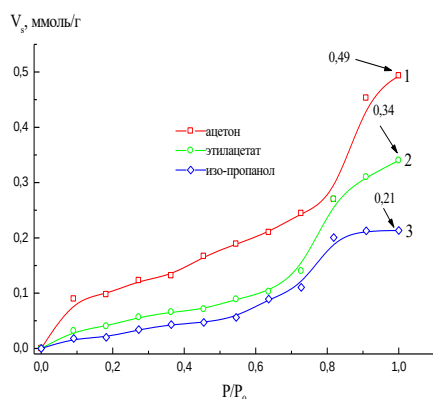
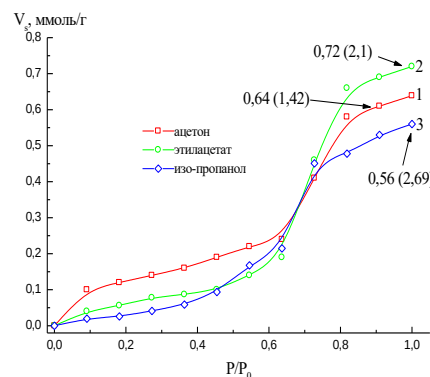


Рисунок 1 – Рентгеновские спектры природного (1) и кислотно активированного шунгита (2), где А-фаза мусковита; В-оксида кремния; С-углерода и D-ферросилиция

Анализ сухого остатка маточного раствора, полученного после активации, показал, что в сухом остатке присутствуют следующие кристаллографические фазы: $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ и $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$.



а



б

Рисунок 2 – Изотермы адсорбции паров ацетона (1), этилацетата(2), изопропанола (3) на природном (а) и активированном H_3PO_4 шунгите (б), на рисунке б в скобках численные значения характеризующий во сколько раз сорбционная емкость активированного шунгита превышает сорбционную емкость исходного по отношению к изученным адсорбатам

Исходя из того, что в области низких давлений изотермы для ацетона, этилацетата, изо-пропанола отклоняется вверх, а затем при более высоких давлениях их наклон уменьшается, при приближении к давлению насыщенных паров величины адсорбции заметно возрастают (рис.2), то согласно классификации приведенной в работах [2,3] изотермы можно отнести к типу IV, который характерен для мезопо-ристых адсорбентов. При анализе данных установлено, что сорбцион-ный объем в зависимости от природы адсорбата (кетонов, эфиров ук-сусной кислоты или спиртов) увеличивается примерно в 1,4-2,7 раза.

В таблице 1 приведены физико-химические характеристики природного и активированного шунгита.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики природного и активированного шунгита

№ п/п	Показатель	Образец	
		Исходный шунгит	Шунгит активиро- ванный H_3PO_4
1.	Содержание целевой фрак- ции (2-3 мм), %	82,1	98,6
2.	Прочность гранул на исти- рание, %	84,0	81,24
3.	Насыпная плотность, г/см ³	1,10	1,07
4.	рН водной вытяжки, ед. рН	7,20	5,1
5.	Удельная поверхность по азоту, м ² /г	12,3	31,84

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что активация шунгита фосфорной кислотой протекает за счет разложения фазы мусковита.

Процесс кислотного активирования природного шунгита привел к увеличению примерно в 1,4-2,7 раза, а удельная поверхность в 1,5-5,0 раз.

Пористая структура природного и активированного шунгита соответствует мезопористым адсорбентам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мдивнишвили О.М. Кристаллохимические основы регулирования свойств природных сорбентов. Тбилиси, Мецниереба, 1978, 268 с.
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. Москва, Химия, 1984, 592 с.
3. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Москва, Мир, 1984, 112 с.

УДК 543.39: 665.081

А.Р. Цыганов, академик, д-р с.-х. наук;
А.С. Панасюгин, гл. науч. сотр., канд. хим. наук;
И.И. Курило, зав. кафедрой, канд. хим. наук;
Н.П. Машерова, доц., канд. хим. наук
(БГТУ, г. Минск);
Н.Д. Павловский, доц., канд. хим. наук
(ГГМУ, г. Гродно)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ (КИСЛОТОСТОЙКОСТИ) НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

В связи с большим объемом закупки импортного оборудования в период с конца 90-х годов прошлого столетия до текущего момента использование стали марки AISI 316L прочно вошло в практику эксплуатации. [1,2]

При этом российский аналог 03X17H14M3 как эквивалент в них не упоминается и не рассматривается, а возможность замены на более доступный аналог 12X18H10T не предполагается.

Актуальность поиска полного аналога импортной стали AISI 316L, при текущей рыночной ситуации в РФ стала тем более острой, что с отечественного рынка в марте 2022 года в большинстве своем ушли поставщики и производители зарубежного оборудования, основным конструкционным материалом которого, например запорной арматуры и КИПиА, являлась нержавеющая сталь марки AISI 316L.[3]

Вместе с тем в первую очередь перед компаниями нефтегазовой отрасли в этой ситуации остро стоит вопрос реализации ранее запланированных проектов, бюджеты которых были сформированы до 2022 года, и их превышение зачастую является не только крайне нежелательным, но и невозможным. При этом в проектную документацию заложено зарубежное оборудование из нержавеющей стали марки AISI 316L, выпуск которой на территории РФ еще не стал массовым, а доступность аналога 03X17H14M3, как уже говорилось, ограничена по причине цены и необходимости заказа крупных промышленных партий, чего не могут себе позволить многие предприятия [4]

Данное решение не только позволит развиваться машиностроительным предприятиям и приборостроительным компаниям России, но и, создав потребление данного конструкционного материала (12X18H10T) в форме стабильного заказа, даст толчок развитию металлургической отрасли и экономике России в целом.

В связи с тем, что наиболее часто в мировой практике в качестве основных аналогов применяемых нержавеющей сплавов, инструментальных и нержавеющей сталей используют стандарт AISI в дальнейшем в качестве реперной точки для определения свойств по химсоставу, механическим свойствам, коррозионной и термической устойчивости он будет использоваться в данной работе.

Для проведения эксперимента по исследованию коррозионной устойчивости образцов Hastelloy B, B-2, C, C22 и G30, а также наиболее популярных марок нержавеющей сталей выпущенных по стандарту AISI и стали 20X13 с использованием лабораторной установки изображенной на рис. 1 [5].

В реактор (2) помещали заданную навеску исследуемого материала (как правило 1,5-2,0 грамма), Взвешивание образцов производили на электронных весах OHAUS Explorer Pro. Через делительную воронку добавляли серную и соляную кислоту с заданными концентрациями при постоянном перемешивании и постоянной температуре (устройства 6-8). Для предотвращения изменения концентраций кислот в ходе эксперимента за счет испарения применяли обратный холодильник (4).

Обращает на себя внимание группа сплавов Хастеллой (зарегистрированная торговая марка компании Haynes International Inc.) – наименование группы сплавов на основе никеля, имеющих высокую стойкость коррозии.

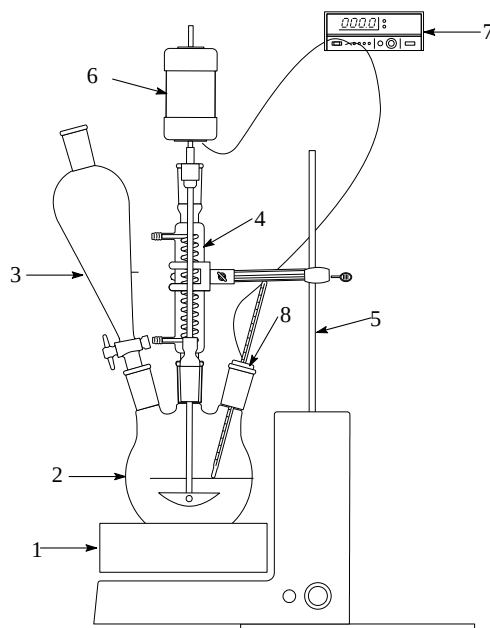


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки изучения коррозионной устойчивости образцов:

1 – термостат, трехгорлая колба (реактор), 3 – делительная воронка, 4 – обратный холодильник, 5 – штатив, 6 – механическая мешалка, 7 – электронный регулятор температуры «сосна 004», 8 – управляющий термометр

Hastelloy – наиболее известный аникоррозионный сплав на базе никеля. Hastelloy применим в атомных и химических реакторах. Сплавы часто применяют с газотермическим напылением на поверхности. Выпускается большое разнообразие марок металлов, например, Hastelloy C-276 – это никелевый сплав с добавлениями хрома, молибдена и вольфрама.

Материал устойчив к точечной, щелевой коррозии и окислам. С азотной кислотой совместим плохо, но эффективен при взаимодействии с серной и соляной кислотами, а также с растворителями. Отличительная особенность C-276 – возможность его эксплуатации при высоком давлении.

Поскольку сплавы Hastelloy B, B-2, C, C22 и G30 наиболее часто используется в агрегатах, предполагающих химические процессы, как элементы вакуумных печей и механические детали для оборудования, эксплуатация, которых предполагает контакт с окислительными средами были проведены исследования по определению коррозионной стойкости по отношению к серной и соляной кислотам (рис. 2 и 3).

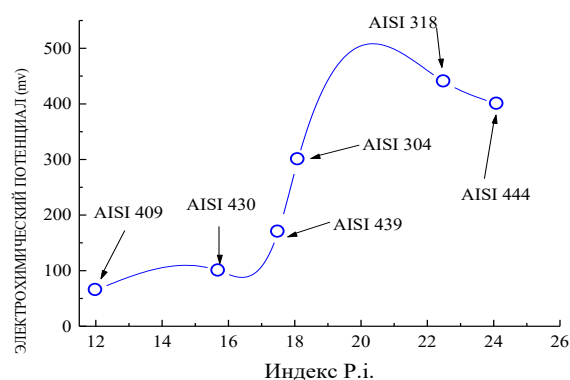


Рисунок 2 – Коррозионная стойкость наиболее популярных марок нержавеющей сталей AISI

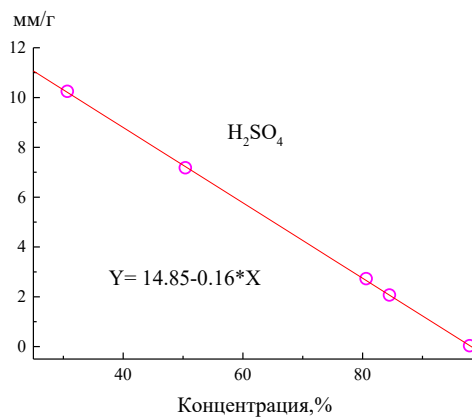


Рисунок 3 – Скорость растворения (коррозии) стали 20X13 от концентрации серной кислоты (30-96%) при 25 °C

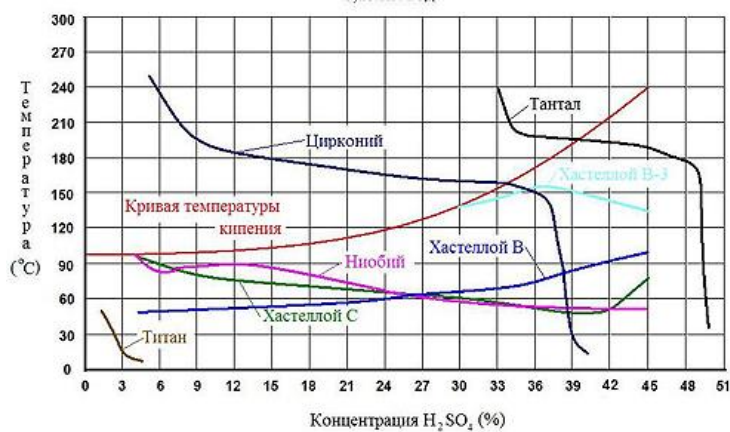


Рисунок 4 – Коррозионная стойкость материалов в серной кислоте (H_2SO_4)

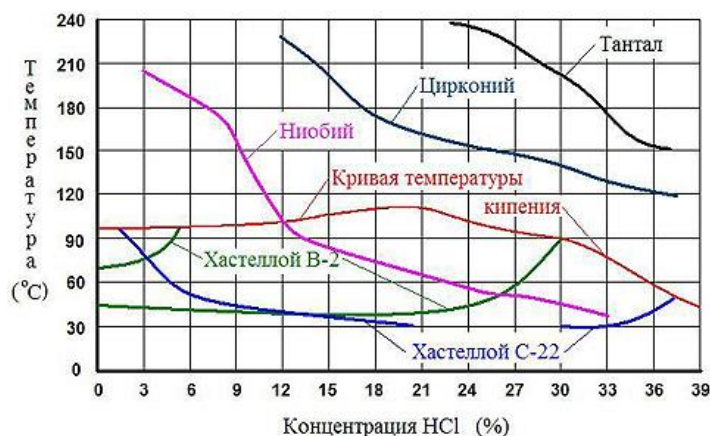


Рисунок 5 – Коррозионная стойкость материалов в соляной кислоте (HCl)

Заключение

Таким образом, нами определена в различных условиях коррозионная устойчивость для наиболее популярных марок нержавеющей сталей, по ряду параметров включающая питтинговую (точечную) коррозию, коррозию сварных швов и механические нагрузки (предел прочности и предел упругости) для наиболее популярных марок нержавеющей сталей из серии AISI и их российских аналогов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Гренадёр, В. О. Оскирко, А. Н. Захаров, И. М. Гончаренко, С. В. Работкин, А. А. Соловьёв, В. А. Семёнов Структура и свойства аустенитной стали AISI 316L после безводородного азотирования//Успехи прикладной физики, 2022, том 10, № 5 с. 469-479
2. Тим Маккрейт /Искусство изготовления// М. «АСТ Астрель», 1003, - 222 с.
3. Э.Г. Зибенайхер, Ш Штайгервальд / Технология изготовления и материалы// М. «Омега», 2007, – 189 с.
4. Роде Е.Я. Физико-химическое изучение окислов и гидроокислов металлов. - Ж. неорг. хим., 1956, 1, 1430
5. ГОСТ. Цветные металлы и сплавы. Методы испытаний; М.: Стандартов, 2004. – 880 с.

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ЭФИРНОГО МАСЛА *SOLIDAGO CANADENSIS*

Применение эфирномасличного сырья и эфирных масел в фармацевтической промышленности обусловлено содержащимися в них биологически активными веществами. Эфирные масла имеют ряд преимуществ перед синтетическими лекарственными препаратами, таких как мягкость действия, отсутствие токсических проявлений при терапевтических дозах, ограниченный диапазон противопоказаний и выраженное биорегулирующее действие при низких концентрациях. Эфирные масла в большинстве случаев не вызывают аллергических реакций и характеризуются высокой активностью в отношении штаммов микроорганизмов и вирусов, устойчивых к антибиотикам и синтетическим лекарственным препаратам.

По литературным данным важную роль в проявлении биологической активности эфирных масел проявляет характер распределения энантиомеров их основных компонентов.

Solidago canadensis L. (Asteraceae) – золотарник канадский – является многолетним корневищным растением, произрастающим в Северной Америке и широко распространенным в Азии, Европе и Австралии. В Беларуси растение считается инвазивным сорняком.

Эфирное масло *Solidago canadensis* (*S. canadensis*) используется в фитотерапии для лечения хронического нефрита, цистита, мочекаменной болезни, ревматизма и в качестве противовоспалительного средства. Различные виды экстрактов надземных и подземных частей *S. canadensis* проявили антимикробную активность в отношении *Listeria monocytogenes* и *Staphylococcus aureus*. По литературным данным эфирное масло *S. canadensis* обладает антибактериальными, противовирусными и противогрибковыми свойствами, обусловленными его компонентным составом. Однако известно, что качественный и количественный состав эфирного масла одного и того же растения существенно зависит от географических и климатических условий его произрастания.

В литературе имеются сведения о компонентном составе эфирного масла растений *S. canadensis*, произрастающих в различных климатических и географических зонах, однако публикации о компонентном составе, характере распределения энантиомеров основных

компонентов и биологической активности эфирного масла золотарника канадского отечественного происхождения отсутствуют.

Цель настоящей работы – хроматографическая идентификация и количественное определение основных компонентов и их энантиомеров в эфирном масле золотарника канадского, произрастающего в Республике Беларусь, а также изучение его антимикробных и антиоксидантных свойств.

Объектом исследования являлось эфирное масло, выделенное из надземной части свежего растительного сырья в фазе цветения, собранного в Минском районе в осенний период 2023 г. Эфирное масло получали из свежесобранного растительного сырья методом гидродистилляции с последующей сушкой безводным сульфатом натрия.

Для установления компонентного и энантиомерного состава эфирного масла использовали газовый хроматограф: «Хроматэк-Кристалл», оснащенный пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой Cyclosil B (30 м×0,32 мм×0,25 мкм). Разделение осуществляли в следующем температурном режиме: $T_{исп} = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{дет} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура колонки ($T_{кол.}$) изменялась следующим образом – изотерма при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин, подъем температуры до $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $2^{\circ}/\text{мин}$, изотерма в течение 40 мин в токе газа-носителя. Линейная скорость потока азота составляла $13,6\text{ см/с}$, величина сброса – 1:26. Объем вводимой пробы цельного эфирного масла составлял $0,1\text{ мкл}$. Временем удерживания несорбирующегося газа считали время выхода пика метана.

Идентификацию компонентов эфирных масел проводили сравнением времен удерживания идентифицируемых пиков с временами удерживания стандартных образцов или индексов Ковача со справочными данными. Количественные определения проводили методом внутренней нормализации по площадям газохроматографических пиков без использования корректирующих коэффициентов.

В условиях линейного градиента температуры расчет ИУ основных компонентов эфирных масел проводили по формуле:

$$ИУ = 100 \left\{ \frac{[t'_{R(x)} + q \lg t'_{R(x)}] - [t'_{R(n)} + q \lg t'_{R(n)}]}{[t'_{R(n+1)} + q \lg t'_{R(n+1)}] - [t'_{R(n)} + q \lg t'_{R(n)}]} + n \right\},$$

где $t'_{R(x)}$, $t'_{R(n)}$, $t'_{R(n+1)}$ – приведенные времена удерживания анализируемого компонента, n -алкана (C_nH_{2n+2}) и следующего n -алкана ($C_{n+1}H_{2n+4}$) соответственно, причем $t'_{R(n)} < t'_{R(x)} < t'_{R(n+1)}$.

Значение q определяли с использованием приведенных времен удерживания трех последовательно выходящих n -алканов по формуле:

$$q = \frac{t'_{R(n)} + t'_{R(n+2)} - 2t'_{R(n+1)}}{\lg(t'^2_{R(n+1)} / t'_{R(n)} \cdot t'_{R(n+2)})}$$

Для количественных определений использовали метод внутренней нормализации без учета поправочных коэффициентов. Все измерения были проведены в четырехкратной повторности.

Антимикробную активность определяли методом диффузии растворов экстрактов в агар (метод бумажных дисков). В качестве тест-культур использовали санитарно-показательные микроорганизмы *Staphylococcus aureus*, *Salmonella alony*, *Bacillus subtilis*, *Clostridium* sp. Суточную культуру микроорганизмов (0,1 мл) распределяли шпателем по поверхности подсохшей плотной питательной среды в чашке Петри. На диски наносили по 10 мкл этанольных растворов экстрактов, выдерживали посевы при 4°C в течение 4 ч с последующим инкубированием в термостате при 30°C в течение 24 ч. Результат учитывали по наличию и диаметру зон ингибирования.

Антиоксидантную активность спиртовых экстрактов оценивали по содержанию полифенольных соединений. Для количественного определения полифенольных соединений в качестве фотометрического реагента использовали 18-молибдендифосфатный гетерокомплекс структуры Доусона (18-МФК). Сумму полифенольных соединений определяли методом градуировочного графика в расчете на стандартное вещество – рутин.

Средний выход эфирного масла из надземной части *S. canadensis* составил 0,50±0,05% в расчете на свежее сырье и 0,30 ± 0,03% в расчете на сухое сырье.

Хроматографический анализ эфирного масла *S. canadensis* позволил обнаружить более 40 компонентов, 25 из которых были идентифицированы. Главными компонентами являлись соединения монотерпенового ряда. Их суммарное содержание составляло более 50 %. Основной вклад вносили мирцен и сабинен, выходящие одним пиком на хроматограмме. Их концентрация достигала ≈25 %. Отмечено высокое содержание α-пинена (≈15 %) и лимонена (≈15 %). Концентрации β-пинена и фелландрена близки и составляют ≈3 %. Сесквитерпеновые соединения в образце представлены преимущественно гермакреном Д, содержание которого достигает ≈30%.

Разделение эфирного масла на хиральной колонке позволило установить, что α- и β-пинены, а также лимонен представлены преимущественно в виде (–)-формы (табл. 1).

Таблица 1 – Распределение энантиомеров компонентов в эфирном масле золотарника канадского

Соединение	Содержание энантиомеров, %	
	(–)	(+)
α -Пинен	99	1
β -Пинен	82	18
Лимонен	88	12

В табл. 2 приведены диаметры зон ингибирования тест-культур микроорганизмов 5%-ми этанольными растворами эфирного масла.

Таблица 2 – Диаметры зон ингибирования роста тест-культур растворами эфирного масла золотарника канадского

Тест-культуры бактерий	Диаметр зоны ингибирования роста, мм
<i>Staphylococcus aureus</i>	17
<i>Salmonella alony</i>	12
<i>Bacillus subtilis</i>	14
<i>Clostridium</i> sp.	14

Анализ полученных данных показывает, что рост грамположительных бактерий подавлялся эфирным маслом *S. canadensis* сильнее, чем рост грамотрицательных микроорганизмов, что связано с особенностями строения их клеточной стенки.

Показатель антиоксидантной активности спиртовых экстрактов золотарника канадского составляет $40 \pm 0,5$ мг рутина в расчете на 1 г растительного сырья.

Полученные хроматографические данные по компонентному и энантиомерному составу эфирного масла золотарника канадского и его биологической активности могут быть использованы при разработке фитопрепаратов направленного терапевтического действия, а также для установления подлинности и контроля качества эфирных масел.

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ
РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ИНДАТА ЛАНТАНА,
ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ
ПРАЗЕОДИМА, САМАРИЯ И ТЕРБИЯ**

Свойства индата лантана LaInO_3 в настоящее время широко исследуются. Твердые растворы на основе LaInO_3 обладают смешанной проводимостью с ионным и дырочным вкладом, причем при понижении температуры ионная проводимость становится доминирующей [1]. Термически и химически стойкий LaInO_3 , легированный ионами щелочноземельных элементов, можно использовать в качестве электролитного материала для твердооксидных топливных элементов, в насосах и датчиках [1, 2]. Индат лантана, легированный ионами галлия Ga^{3+} ($\text{La}_{1-x}\text{Ga}_x\text{InO}_3$) и азота N^{2-} ($\text{LaInO}_{1-y}\text{N}_y$), проявляет значительную активность в фоторазложении воды на H_2/O_2 при облучении ультрафиолетовым и видимым светом, поэтому его можно использовать в качестве фотокатализатора [3]. Наноразмерный LaInO_3 показал свою эффективность в электрокаталитическом превращении CO_2 в формиаты [4]. LaInO_3 , легированный ионами редкоземельных элементов, перспективен для использования в светодиодах [5].

Твердофазным методом из оксидов La_2O_3 , In_2O_3 , Pr_6O_{11} , Tb_2O_3 , Sm_2O_3 (квалификация «х. ч.») проведен синтез образцов твердых растворов на основе LaInO_3 , содержащих не более 6 мол. % легирующих ионов Pr^{3+} , Sm^{3+} , Tb^{3+} . Приведенные на рис. 1 фотографии поверхностей сколов керамических образцов $\text{La}_{0.92}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0.977}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{InO}_3$, полученные на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV (JEOL, Япония), показывают, что они состоят из частиц округлой формы, размер которых находится в интервале 0.5–2.5 мкм. Морфология частиц в образцах не зависит от состава.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) получены на модернизированном спектроизмерительном комплексе СДЛ-2 (ЛОМО, СССР) в Институте физики имени Б.И. Степанова НАНБ. В спектре ФЛ $\text{La}_{0.92}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}_3$, полученном при длине волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм (рис. 2а), одновременно присутствуют полосы ФЛ ионов Sm^{3+} и полоса ионов Tb^{3+} с $\lambda_{\text{макс}} = 543$ нм (зеленая область видимого спектра).

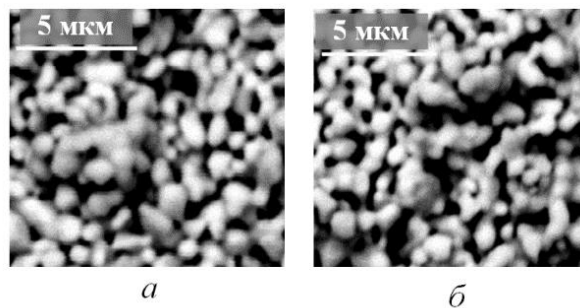


Рисунок 1 – Фотографии поверхностей сколов керамических образцов $\text{La}_{0.92}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}_3$ (а), $\text{La}_{0.977}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{InO}_3$ (б)

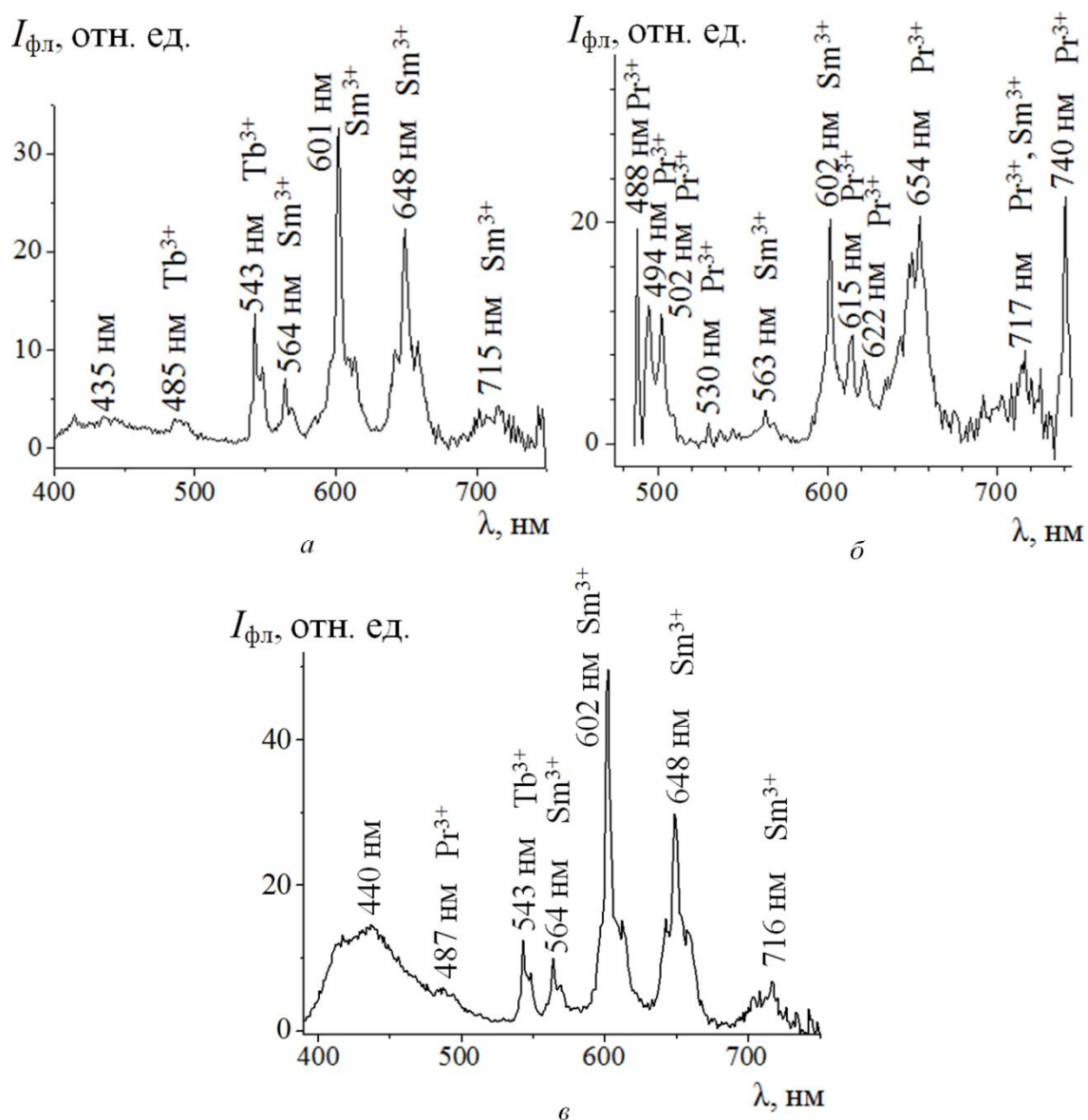


Рисунок 2 – Спектры ФЛ $\text{La}_{0.92}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}_3$ при $\lambda_{\text{в036}} = 365$ нм (а), $\text{La}_{0.977}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{InO}_3$ при $\lambda_{\text{в036}} = 470$ нм (б), $\text{La}_{0.917}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}$ при $\lambda_{\text{в036}} = 320$ нм (в)

На спектре ФЛ $\text{La}_{0.977}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{InO}_3$, при $\lambda_{\text{возб}} = 470$ нм (рис. 2б) наблюдаются как полосы ФЛ ионов Pr^{3+} , так и ионов Sm^{3+} . В спектре ФЛ $\text{La}_{0.917}\text{Pr}_{0.003}\text{Sm}_{0.02}\text{Tb}_{0.06}\text{InO}_3$, полученном при $\lambda_{\text{возб}} = 320$ нм (рис. 2в), присутствуют интенсивные полосы ФЛ ионов Sm^{3+} ($\lambda_{\text{макс}} = 564, 601, 650, 716$ нм), а также полосы ФЛ ионов Pr^{3+} ($\lambda_{\text{макс}} = 488, 494, 502$ нм) и ионов Tb^{3+} ($\lambda_{\text{макс}} = 543$ нм), интенсивность которых значительно ниже.

Таким образом, в работе показана возможность получения образцов, в которых происходит одновременное излучение света несколькими оптически активными ионами редкоземельных элементов. Изменяя природу и количество легирующих ионов можно получить различный цвет свечения, в том числе белый.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проведении научных работ фундаментального и прикладного характера, посвященных решению проблем физики и химии магнитных материалов, фотолюминофоров на основе LaInO_3 со структурой перовскита, легированного ионами редкоземельных элементов, и их использованию при изготовлении светодиодов белого света и других устройств электронной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sr-doped LaInO_3 and its possible application in a single layer SOFC / H. He [et al.] // Solid State Ionics. – 2000. – Vol. 130, № 3. – P. 183–193. DOI: 10.1016/S0167-2738(00)00666-4
2. Doping effects on the structure, transport properties, and chemical stability of LaInO_3 perovskite: A review / Egorova, A [et al.] // Chimica Techno Acta. – 2025. – Vol. 12(1), № 12111 – P. 2411–1414. DOI: 10.15826/chimtech.2025.12.1.11
3. Structural and photophysical characterization of some $\text{La}_{2x}\text{Ga}_{2y}\text{In}_{2z}\text{O}_3$ solid solutions, to be used as photocatalysts for H_2 production from water/ethanol solutions / P. L. Gentili [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2010. – Vol. 94, № 12. – P. 2265–2274. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.07.024
4. Nanosized LaInO_3 perovskite for efficient electrocatalytic reduction of CO_2 to formate / Y. Zhu [et al.] // Journal of CO_2 Utilization. – 2023. – Vol. 68 – P. 102342. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102342
5. Synthesis and luminescent properties of LaInO_3 : RE^{3+} ($\text{RE} = \text{Sm}, \text{Pr}$ and Tb) nanocrystalline phosphors for field emission displays / X. Liu [et al.] // Solid State Sci. – 2009. – Vol. 11. – P. 2030–2036. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2009.09.014

С.В. Шевченко, доц., канд. хим. наук;
Е.А. Чижова, доц., канд. хим. наук;
М.В. Морозов, выпускник;
Е.А. Степаньков, студ.;
А.Э. Селейкович, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ДЕФИЦИТА КАТИОНОВ НЕОДИМА И БАРИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$

Кислороддефицитные двойные перовскиты на основе редкоземельных элементов, бария и $3d$ -металлов, к которым относится ферроупрокобальтит неодима–бария $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$, обладая комплексом уникальных свойств, представляют интерес в качестве основы для разработки новых функциональных материалов различного назначения, в том числе материалов для создания катодов среднетемпературных твердооксидных топливных элементов на основе протон- или кислородионпроводящих твердых электролитов [1–5].

Ранее нами было изучено влияние дефицита катионов неодима или бария на структуру и свойства ферроупрокобальтита неодима–бария [6]. Целью настоящей работы было исследование влияния дефицита катионов одновременно в подрешетках неодима и бария на структуру и свойства слоистого перовскита $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$.

Образцы состава
 $\text{NdBa}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$, $\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{Co}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$,
 $\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ получали методом твердофазных реакций из Nd_2O_3 (НО–Л), BaCO_3 (ч), Fe_2O_3 (ос.ч. 2–4), Co_3O_4 (ч) и CuO (ч.д.а.) в течение 40 ч на воздухе при 1173 К, затем после промежуточного перетирания и прессования спекали при 1273 К на воздухе в течение 10 ч.

После заключительной стадии синтеза все образцы, в пределах погрешности РФА, были однофазными, их структура соответствовала структуре $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ с параметрами кристаллической ячейки $a = 0.3918\text{--}0.3921$ нм, $c = 0.7698\text{--}0.7707$ нм (табл. 1), которые незначительно уменьшались при создании дефицита катионов неодима и бария.

Полученные керамические образцы имели кажущуюся плотность $6.06\text{--}6.20$ г/см³ (табл. 2), что составляет 90–98 % от рентгенографической, при этом создание дефицита катионов неодима и бария приводило к снижению пористости, что говорит о том, что спекаемость образцов улучшалась. Индекс кислородной нестехиометрии δ ,

определенный с помощью йодометрического титрования, уменьшался от 0.81 для базовой фазы до 0.65 для $\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$.

Таблица 1 – Параметры элементарной ячейки (a , c , V), степень тетрагонального искажения ($c/2a$) и индекс кислородной нестехиометрии катиондефицитных перовскитов $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$

Состав	a , Å	c , Å ³	V , Å	$c/2a$	δ
$\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	3.9212	7.7072	118.503	0.9828	0.81
$\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	3.9178	7.6982	118.162	0.9825	0.73
$\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	3.9182	7.7067	118.318	0.9834	0.65

Таблица 2 – Рентгенографическая (грент), кажущаяся (гкаж), относительная (гогн) плотности, общая (П) пористость керамики $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$

Состав	$\Gamma_{\text{грент}}$, г/см ³	$\Gamma_{\text{каж}}$, г/см ³	$\Gamma_{\text{огн}}$, %	П, %
$\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_5$	6.71	6.06	90.3	9.7
$\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	6.53	6.10	93.4	6.6
$\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	6.32	6.20	98.1	1.9

Удельная электропроводность (σ) (рис. 1 *а*) носила полупроводниковый характер, при этом ее величина увеличивалась от 0.19–0.37 См/см при 300 К до 40.7–45.9 См/см при 1000 К. Энергия активации проводимости, рассчитанная из линейных участков зависимости $\ln(\sigma \cdot T) = f(1/T)$, составляла 0.305–0.270 эВ (табл. 3), несколько снижаясь для катиондефицитных образцов.

Таблица 3 – Значения энергий активации электропереноса (E_{σ} , E_S , E_m) в керамических образцах $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$

	E_{σ} , эВ	E_S , эВ	E_m , эВ	E_p , эВ
$\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_5$	0.305	0.066	0.239	0.155
$\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	0.288	0.097	0.191	0.188
$\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	0.270	0.072	0.198	0.136

Все полученные керамические образцы являлись проводниками *p*-типа, коэффициент термо-ЭДС (S) (рис. 1 *б*) которых с ростом температуры снижался вплоть до температур 900–1000 К, а с ростом дефицита катионов увеличивался. Фактор мощности, рассчитанный по формуле $P = \sigma \cdot S^2$, для катиондефицитных образцов при повышенных температурах оказался выше, чем для базового состава (рис. 1 *в*).

По методике [6] были рассчитаны концентрация основных носителей заряда (рис. 2 *а*) и их взвешенная подвижность (рис. 2 *б*). Как видно из рис. 2, взвешенная подвижность носителей заряда (μ) в исследованных образцах в интервале температур 300–700 К изменялась в пределах 0.04–0.75 см²/(В·с) и увеличивалась с ростом температуры, что является характерным для поляронного механизма проводимости.

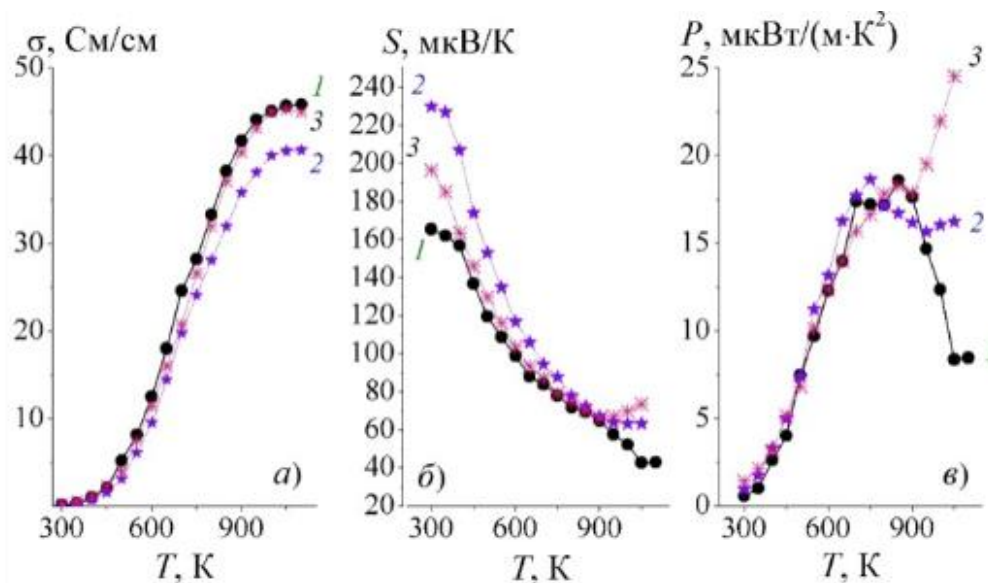


Рисунок 1 – Температурные зависимости электропроводности (а), коэффициента Зеебека (б) и фактора мощности (в) $\text{NdBa}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (1), $\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{Co}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (2), $\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (3)

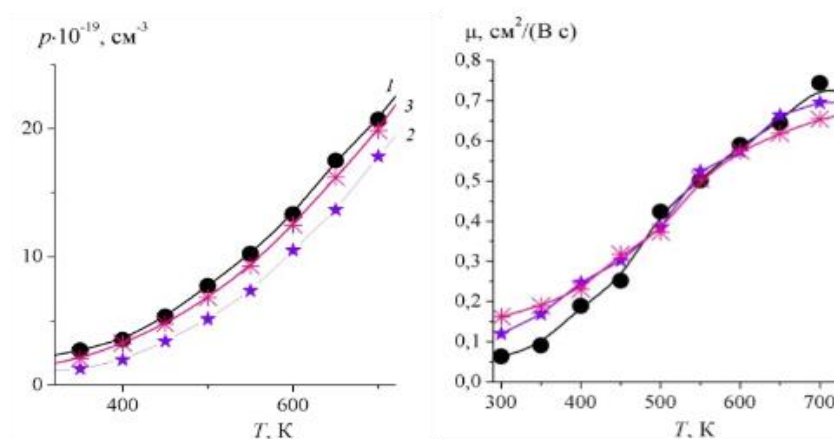


Рисунок 2 – Температурные зависимости концентрации носителей заряда (а), взвешенной подвижности заряда (б) в образцах $\text{NdBa}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (1), $\text{Nd}_{0.95}\text{Ba}_{0.95}\text{Co}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (2), $\text{Nd}_{0.90}\text{Ba}_{0.90}\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ (3)

Концентрация носителей заряда «дырок» в том же интервале температур варьировалась в пределах $(1\text{--}22) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2 а), в целом, увеличиваясь при создании дефицита катионов неодима и бария при комнатной температуре, и экспоненциально возрастала с увеличением температуры.

Таким образом, в настоящей работе были получены феррокупрокобальтиты неодима–бария, имеющие 5 и 10 мол. % дефицита катионов неодима и бария.

Установлено, что дефицит катионов бария и неодима приводит к незначительному уменьшению параметров кристаллической струк-

туры, улучшению спекаемости, некоторому снижению энергии активации проводимости, росту коэффициента термо-ЭДС и фактора мощности при повышенных температурах, практически не влияя на подвижность носителей заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Double substituted $\text{NdBa}(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu})_2\text{O}_{5+d}$ layered perovskites as cathode materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells – correlation between structure and electrochemical properties / A.I. Klyndyuk [et al.] // *Electrochimica Acta*. – 2022. – P. 140062.
2. Klyndyuk, A.I., Zhuravleva Ya.Yu. Structure and Physicochemical Properties of $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ Solid Solutions ($0.00 \leq x \leq 0.40$) / A.I. Klyndyuk, Ya. Yu Zhuravleva // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2022. – Vol. 67, N. 12. – P. 2084–2089.
3. Электротранспортные и термические свойства твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Mg}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+d}$ ($0.00 \leq x \leq 0.40$) / Е. А. Чижова [и др.] // *Физика и химия стекла*. – 2023. – Т. 49, № 1. – С. 71–79.
4. Катиондефицитные производные $\text{NdBa}(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cu})_2\text{O}_{5+d}$: синтез, структура и свойства / Е.А. Чижова [и др.] // *Химическая технология и техника: материалы 87-й науч.- техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 17 февраля 2023 г. [Электронный ресурс] / БГТУ. – отв. за издание И.В. Войтов; УО «БГТУ». – Минск: 2023. – С. 198–202.*
5. Структура и электротранспортные свойства катиондефицитных производных слоистого ферроупрокобальтита неодима–бария / Е.А. Чижова [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 339–348.
6. Weighted Mobility/ G.J. Snyder [et al.] // *Advanced Materials*. – 2020. – Vol. 35 – P. 2001537.

В.А. Ашуйко, доц., канд. хим. наук;
И.Е. Малашонок, доц., канд. хим. наук;
Н.А. Гвоздева, доц., канд. техн. наук;
С.Л. Радченко, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

В настоящее время актуальной задачей является защита от коррозии сооружений, техники, изделий из металлов. Одним из наиболее надежных и относительно дешевых способов антикоррозионной защиты является нанесение лакокрасочных покрытий. При окрашивании металлических изделий основную противокоррозионную функцию выполняет грунтовочный слой, защитное действие которого определяется природой компонентов лакокрасочного материала (ЛКМ), который представляет собой многокомпонентные композиции, содержащие пленкообразователи, растворители, пигменты, наполнители и другие добавки, используемые для получения покрытий [1].

Основой для производства керамических красок являются пигменты. Для расширения палитры керамических пигментов и использования в качестве исходных компонентов нашли широкое применение природные сырьевые материалы, которые используются в качестве кристаллических решеток-акцепторов (шпинель первого и второго типа, циркон, перовскит и др.). При включении в решетку ряда минералов ионов переходных металлов (Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} и др.) они приобретают характерную окраску, которая обусловлена поглощением света за счет d-d-переходов электронов, либо за счет переноса заряда. При синтезе пигментов в решетку акцептора входят атомы d-элементов путем внедрения в междоузлия кристаллической решетки и образования твердых растворов внедрения с соблюдением электронейтральности, в случае ее нарушения образуются нестехиометрические соединения. Кроме того, с ионами-хромофорами могут образовываться твердые растворы вычитания и замещения. Вхождение в кристаллическую решетку перечисленных ионов обеспечивается твердофазными реакциями при температурах (1200-1300°C). Окраска пигментов зависит не только от химической природы вводимого иона-хромофора, но и от координации, в которой он находится, а также от уровня симметрии координационного полиэдра.

Применение фосфатов позволяет расширить цветовую палитру пигментов, снизить температуру синтеза, исключить из состава шихты минерализаторы. На основе их структур синтезировано большое количество пигментов, в последние годы с целью расширения цветовой палитры и привлечения новых сырьевых материалов в качестве кристаллических решеток используются природные и искусственные фосфаты. При синтезе керамических пигментов на основе фосфатов используются особенности их кристаллических структур, в частности гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$.

Неорганические фосфатные пигменты позволяют обеспечивать лакокрасочным покрытиям высокую химическую и коррозионную стойкость, благодаря диссоциации фосфатов под действием воды, проникающей в покрытие с образованием комплексной кислоты, которая реагирует с ионами железа на анодных участках. При этом на стальной поверхности образуются стабильные, прочно удерживаемые комплексные ингибиторы коррозии [2].

Эффективность защитного действия грунтовок определяется их адгезионно-когезионными, диффузионными и электрохимическими свойствами, на которые оказывают влияние все компоненты ЛКМ, в том числе и пигменты, важными характеристиками которых являются укрывистость, коррозионная стойкость, реакция водной вытяжки (pH).

Целью работы является изучение возможности синтеза керамических пигментов на основе гидроксиапатита, полученного из костяного шрота - промышленного отхода, являющегося продуктом переработки костей животных при получении преципитата, а также разработка способов направленного регулирования процессов структуро- и фазообразования синтеза пигментов, обладающих высоким коэффициентом отражения света, повышенной термической и химической стойкостью, установление взаимосвязи температурно-временных параметров синтеза, содержания вводимых ионов-хромофоров с типом и количеством формирующихся цветонесущих фаз, обеспечивающих насыщенную окраску и широкую цветовую гамму пигментов.

Применение фосфатов позволяет расширить цветовую палитру пигментов, снизить температуру синтеза, исключить из состава шихты минерализаторы. На основе их структур синтезировано большое количество пигментов, в последние годы с целью расширения цветовой палитры и привлечения новых сырьевых материалов в качестве кристаллических решеток используются природные и искусственные фосфаты.

При синтезе керамических пигментов на основе фосфатов отмечаются особенности их кристаллических структур, в частности гид-

роксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. В структуре апатита возможны изо-морфные замещения в анионной и катионной подрешетках.

Учитывая тип структуры гидроксиапатита, для синтеза пигментов был избран метод пропитки костяной золы растворами солей 3d-элементов, с последующей сушкой суспензии при температуре 90-100°C в сушильном шкафу, обжигом при 1000-1050-1100°C, помолом синтезированного пигмента до остатка на сите №0056 более 0,5% и промывкой в центрифуге. В качестве ионов-хромофоров использовались ионы Co^{2+} , Cr^{3+} , Ni^{2+} , которые вводились в состав масс водными растворами соответствующих солей в количестве 5-25% в пересчете на оксиды.

Химический состав обожженного шрота, мас. %: Na_2O – 0,91; MgO –0,75; P_2O_5 – 29,39; CaO – 69,02. Костный шрот после выгорания органических веществ содержит минеральную часть с массовым соотношением $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ равным 2,36, у гидроксиапатита оно равно 1,31, соответственно.

Согласно результатам рентгенофазового анализа обожженный шрот является типичным гидроксиапатитом, присутствует карбонат кальция в виде ватерита. Таким образом, после обжига костяной муки при 800 °C образуется гидроксиапатит с каналами наполовину заполненными ионами OH^- . Оставшиеся каналные вакансии могут заполняться ионами-хромофорами Co^{2+} , Cr^{3+} , Ni^{2+} . Наличие такой структуры гидроксиапатита позволит синтезировать на его основе керамические термостойкие пигменты.

В зависимости от вида используемого иона-хромофора в исследуемой системе были синтезированы пигменты широкой цветовой гаммы: серо-голубого, синего, темно-синего, салатного, фиолетового, зеленого, светло-зеленого цвета. Синтезированные керамические пигменты характеризуются однотонной, яркой и насыщенной окраской. Пигменты, обожженные при температуре 1000°C, обладают невысокими хромофорными свойствами, что свидетельствует о недостаточном количестве в них цветонесущей фазы. Выявлено, что оптимальной температурой синтеза является 1100°C. При указанной температуре получены порошки средней плотности, имеющие насыщенную окраску.

Для изучения хромофорных свойств синтезированных пигментов были получены кривые спектрального отражения на спектрофотометре СФ–18 с автоматической записью спектров отражения в области длин волн 400–750 нм.

В ходе проведения экспериментов были определены коэффициент отражения и цветовые характеристики синтезированных пигментов.

тов оптимальных составов. На кривых спектрального отражения пигментов, содержащих ион Cr^{3+} , доминирующая длина волны располагается в области 500–530 нм, что соответствует зеленой области спектра. Коэффициенты спектра отражения у кобальтосодержащих пигментов возрастают в области 470–487 нм, что соответствует синеголубому цвету. Синий и голубой цвет полученных кобальтсодержащих пигментов, вероятно, обусловлен присутствием ионов кобальта, находящимися в тетраэдрическом поле ионов кислорода.

Установлено, что коэффициенты отражения никельсодержащих пигментов достаточно высокие (80–90%), что соответствует светлым малонасыщенным тонам. Пигменты, окрашенные ионом Ni^{2+} , характеризуются светло-зеленым цветом, который при увеличении температуры синтеза переходит в насыщенный салатный. Данная окраска синтезированных никельсодержащих пигментов, вероятно, обусловлена тетраэдрической координацией иона никеля (II) и объясняется поглощением, связанным с переносом заряда.

Для изучения процесса фазообразования в исследуемых системах, методом рентгенофазового анализа определен фазовый состав пигментов. Установлено, что основными кристаллическими фазами являются: гидроксиапатит, фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, а также ионы – хромофоров в виде соответствующих оксидов. Вероятно, максимальная температура обжига 1100°C является недостаточной для формирования цветонесущих фаз и окраска пигментов обусловлена адсорбцией ионов-хромофоров на поверхности гидроксиапатита.

В результате проведенных исследований разработаны температурно-временные параметры синтеза и установлены количественные соотношения исходных компонентов шихт, обеспечивающих, высокую термическую и химическую стойкость.

Установлены оптимальные составы с чистотой тона 23-45%, кислотостойкостью к раствору 96%-ной H_2SO_4 97,8-98,5%, щелочестойкостью к 20%-ному NaOH 96,5-98,8%, pH водной вытяжки составил 8,2-11.

В результате проведения испытаний синтезированных пигментов получены положительные результаты. Пигменты разработанных составов могут быть рекомендованы для окрашивания глазурей, керамических масс, ангобов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туманов, С. Г. Синтез керамических красок / С.Г. Туманов // Стекло и керамика. – 1984. – №5. – С. 237–262.
2. Пищ, И.В. Керамические пигменты: учеб. пособие / И. В. Пищ, Г. Н. Масленникова. – Мн.: Вышэйшая школа, 2005. – 235 с.

С.А. Дониёров; Д.А. Хандамов, д-р хим. наук;
А.Ш. Бекмирзаев (PhD), проф.; Ш.Б. Хонқулов
(Ташкентский химико-технологический институт, г. Ташкент, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИИ ИОНОВ ХРОМА НА ПРИРОДНЫХ И АКТИВИРОВАННЫХ БЕНТОНИТАХ

В настоящее время, с увеличением спроса на кожаную продукцию, количество предприятий по переработке кожи продолжает расти. В кожевенных производствах хромовые соли являются наиболее часто используемыми для обработки кожи. Однако из-за сброса неочищенных сточных вод этих предприятий в водоемы, наблюдается негативное воздействие на окружающую среду. В последнее время ускорение индустриализации приводит к увеличению концентрации и накоплению хромовых ионов в воде и окружающей среде, поскольку хром является одним из самых распространенных металлов в водоемах [1]. Хромовые соли, используемые в сточных водах, составляют около 25-30% от общего количества хромовых соединений, применяемых в процессах кожевенного производства [2]. Высокая концентрация хрома представляет собой серьезную угрозу для здоровья человека [3]. В данном исследовании использовались дешевые адсорбенты – природный Дехқонободский бентонит (DB) и активированный 15% серной кислотой бентонит (DB15), для удаления Cr^{6+} из воды. Для определения влияния температуры на процесс адсорбции были проведены эксперименты по изотермам адсорбции хромовых ионов при разных температурах: 288, 293, 298, 308 и 318 К. Эксперименты проводились при различных начальных концентрациях Cr^{6+} , варьирующихся от 0,05 до 0,5 мг/л [4]. Из полученных изотерм адсорбции видно, что с повышением температуры в интервале 288-298 К увеличивается количество адсорбированных хромовых ионов.

Это связано с тем, что повышение температуры способствует увеличению кинетической энергии молекул, что ускоряет движение хромовых ионов, увеличивая их диффузию в активные центры и поры адсорбентов. Однако при температуре от 308 до 318 К наблюдается снижение эффективности адсорбции. Это может быть связано с тем, что при высоких температурах хромовые ионы приобретают высокую кинетическую энергию, что способствует их более свободному движению. Условия эксперимента: концентрация бентонита 1,0 г/л, pH среды = 7,0, время взаимодействия адсорбента с адсорбатом = 60 минут, скорость перемешивания = 150 об/мин

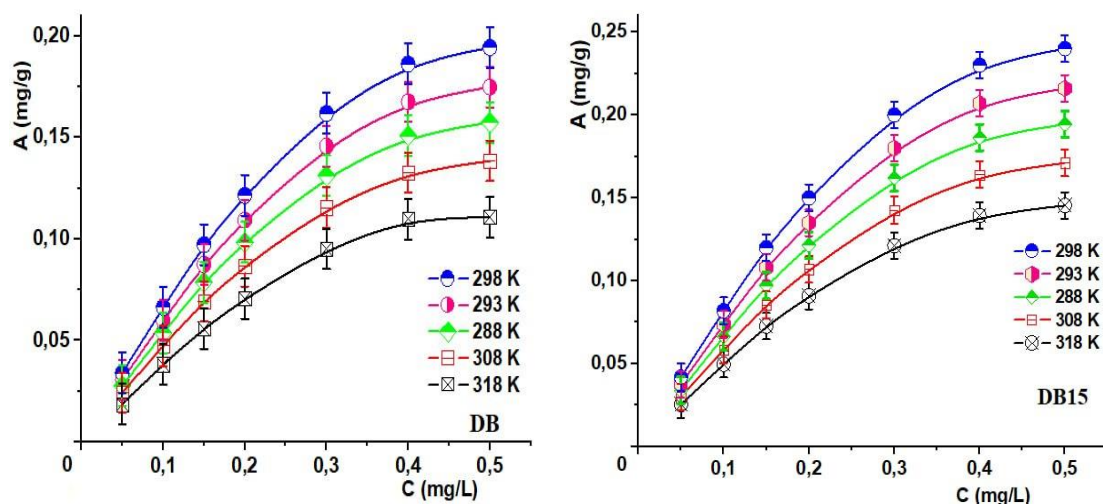


Рисунок 1 – Изотермы адсорбции ионов хрома на адсорбентах DB и DB15 при различных температурах (288, 293, 298, 308 и 318 K)

При анализе адсорбции ионов хрома на кислотно-активированных бентонитах использовались модели адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радushkevича (Д-Р). Применение этих моделей способствует более точному описанию физико-химических механизмов адсорбции и адсорбционного процесса [5-6].

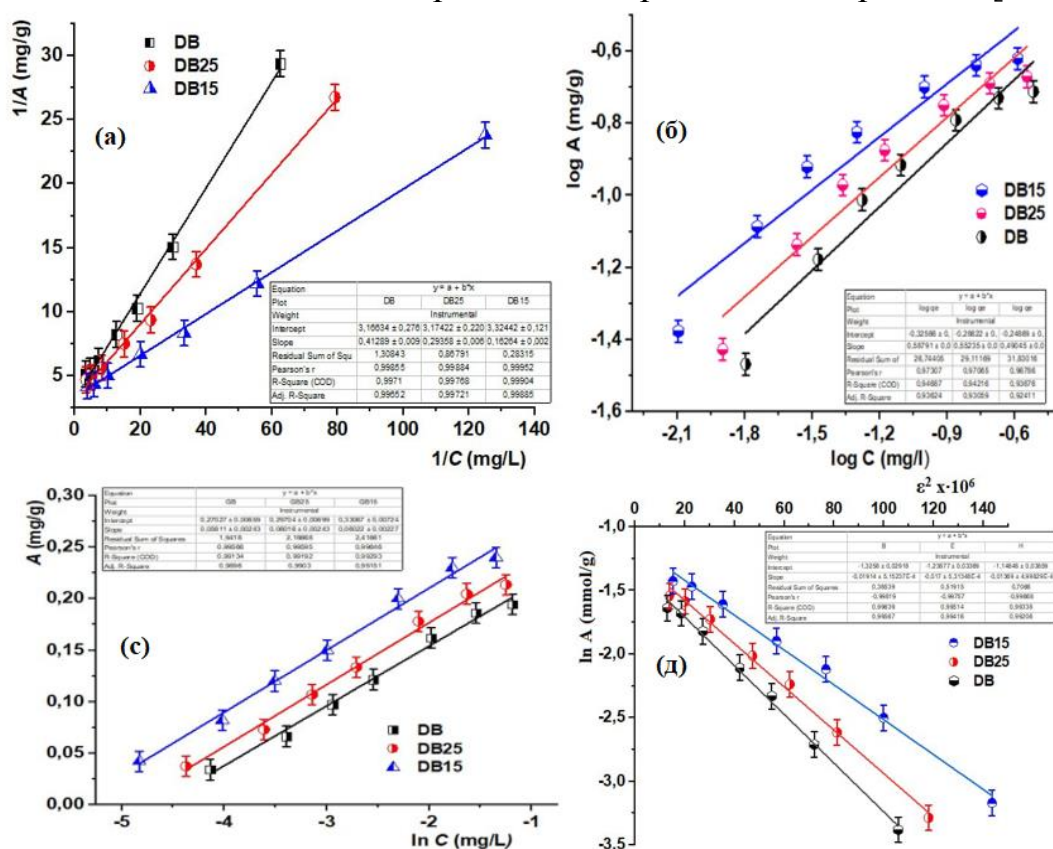


Рисунок 2 – Графики изотермических моделей Ленгмюра (а), Фрейндлиха (б), Темкина (с), Дубинина-Радushkevича (д) для адсорбции ионов хрома на адсорбентах

Для моделей Ленгмюра, DB, DB15 и DB25 были определены максимальные значения адсорбционной ёмкости ($q_{\max}$ (мг/г)): для DB – 0,315 мг/г, для DB25 — 0,305 мг/г, а для DB15 – 0,325 мг/г. Значение склонности к адсорбции, K_L (Л/мг), оказалось наибольшим для DB15 (20,440 Л/мг), что свидетельствует о высоком его сродстве к ионам PO_4^{3-} . Значение R^2 для модели Ленгмюра было высоким для всех трёх адсорбентов (DB: 0,996; DB25: 0,997; DB15: 0,998), что подтверждает хорошее соответствие модели данным.

Данные о адсорбции хромовых ионов в воде на кислотно-активированных адсорбентах DB, DB15 и DB25 согласно моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радushкевича приведены в следующей таблице

Таблица – Данные по адсорбции ионов хрома на кислотно-активированных бентонитах марок DB, DB15 и DB25 по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радushкевича

Модели изотерм	Параметры	Адсорбенты		
		DB	DB25	DB15
Ленгмюра	$q_{\max}$ (мг/г)	0,305	0,315	0,325
	K_L (Л/мг)	7,668	10,812	20,440
	R_L	0,025	0,018	0,009
	R^2	0,996	0,997	0,998
Фрейндлиха	K_F (мг/г)	2,116	1,932	1,772
	$1/n$	0,588	0,552	0,365
	n	1,700	1,81061	2,039152
	R^2	0,977	0,942	0,936
Темкина	B_T (Ж/моль)	0,058	0,060	0,060
	K_T (Л/мг)	104,690	139,421	242,507
	R^2	0,989	0,990	0,991
Дубинина-Радushкевича	q_m (мг/г)	0,265	0,289	0,317
	β_d (моль ² /к ²)	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
	E (кЖ/моль)	161,796	171,498	191,040
	R^2	0,995	0,994	0,992

Значения $1/n$ и n модели Фрейндлиха для DB, DB25 и DB15 составляют соответственно: $n = 1,7$; 1,81 и 2,03. Поскольку $n > 1$, это указывает на благоприятный процесс адсорбции.

Для модели Фрейндлиха наибольшее значение R^2 было получено для DB (0,977), в то время как для DB25 и DB15 значения составляют 0,942 и 0,936 соответственно.

По модели Темкина параметр B_T для всех трёх адсорбентов составил: DB – 0,058, DB25 – 0,060, DB15 – 0,060. Значения R^2 для модели Темкина составили: для DB – 0,989, для DB25 – 0,990, и для DB15 – 0,991, что подтверждает хорошее соответствие модели данным.

По модели Дубинина-Радужкевича энергия адсорбции (E , кДж/моль) для DB15 была наибольшей (191,04 кДж/моль), что свидетельствует о наличии химической адсорбции.

В заключение можно сказать, что модель адсорбции Ленгмюра для всех адсорбентов DB, DB25 и DB15 имеет высокие значения R^2 и хорошо описывает данные. Среди адсорбентов бентонит DB15 продемонстрировал наивысшую эффективность адсорбции по всем моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Owlad M., Aroua M.K., Daud W.M.A.W. Hexavalent chromium adsorption on impregnated palm shell activated carbon with polyethyleneimine // *Desalination* 2010. P.71–77. Doi: 10.1016/j.desal.2009.12.003.
2. Owlad M., Aroua M.K., Daud W.A.W., Baroutian S. Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2009. P.311–333 Doi: 10.1007/s11270-009-0030-3
3. M. Murugesan., M. Sathishkumar., K. Swaminathan. Bioremediation of chromium contaminated soil: optimization of operating parameters under laboratory conditions // *Journal of Hazardous Materials* 2006. P.29–36. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.048.
4. Li X., Wu D. *Nanoclay Applications in Advanced Materials: Bentonite-Based Nanocomposites* // *Journal of Nanotechnology*. 2025 №42(7), P.1312-1324.
5. Rengaraj S., Yeon K., Moon S.H. Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins // *Journal of Hazardous Materials*. 2001. P.255–264 Doi: 10.1016/S0304-3894(00)00305-1
6. Shukla S.R., Dabhade S.P. Separation, recovery and recycling of chromium from wastewater obtained during reverse osmosis treatment of tannery effluent // *Resources, Conservation and Recycling*. 1992. P.105–113 Doi: 10.1016/0921-3449(92)90047-2.

УДК 544.6.018; 544.6.076; 544.63

М.Д. Белов, студ.; А.О. Сухарев, студ.;
С.А. Граири, студ.; А.В. Афанасьева, студ.
(КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛИРОВКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ

В современном производстве нашли широкое применение аддитивные методы изготовления деталей из-за ряда своих преимуществ в

сравнении с традиционными методами. Детали, изготовленные из спеченного порошка аддитивным методом, имеют высокую шероховатость поверхности (порядка 10-20 мкм), которая затрудняет применение этих деталей из-за высоких требований к качеству поверхности. Это связано с тем, что детали изготавливаются из металлического порошка, в результате чего присутствуют неровности и поры. В виду этого современное производство требует применения эффективных методов обработки печатных поверхностей, так как, традиционные механические и химические методы обработки могут быть малоприменимы для печатных деталей зачастую обладающих сложной геометрией рабочих поверхностей в сравнении с изготовленными традиционными методами. Один из наиболее универсальных и перспективных методов обработки печатных изделий – струйная электролитно-плазменная обработка (далее ЭПО) позволяющая производить высокоточную обработку поверхности с практически любой геометрией. ЭПО легко подстраивается под обработку любого сплава и обладает высокими показателями эффективности в сравнении с сухим ЭПО и с традиционными методами обработки.

В связи с тем, что технология только начинает получать широкое распространение существует множество вопросов по поводу её применения в производственных условиях. Условно все данные вопросы можно свести к «эффективности» данного способа обработки. Так как, метод позиционируется универсальным, но при этом основан сразу на принципах действия: электроэрозионное воздействие и электрохимическая полировка, то закономерно встаёт вопрос о стабильности и эффективности действия в широком спектре задач (материалов). Потому были проведены исследования эффективности технологии ЭПО для различных типов сплавов: жаропрочные сплавы (ВЖ159), нержавеющей стали (12Х18Н10Т), стали используемые в подвижных элементах области двигателестроения (РН1).

Для проведения эксперимента с использованием ЭПО применялась лабораторная установка (рис. 1), описанная в [1]. Инструментом обработки и одновременно катодом являлась сопло, в качестве анода использовались исследуемые образцы. Установка создает направленную струю электролита и может перемещать как деталь и сопло в пространстве по заданной программе. Сопло представляет собой трубку из нержавеющей стали, покрытая изолирующим материалом, который формирует струю. К соплу подается электролит из резервуара, который после истечения из сопла стекает в поддон и из его перетекает в резервуар. Перемещение сопла осуществляется промышленным роботом KUKA.



Рисунок 1. Фотография установки для проведения ЭПО

При составлении карт технологического процесса, необходим подбор режимов обработки для достижения высокого качества поверхности и сохранения размеров детали. В свою очередь подбор режима и времени обработки невозможен без знаний об эффективности обработки сплавов. В связи с этим для исследования эффективности струйного ЭПО было выбрано три распространенных сплава для аддитивного производства:

- ВЖ159 химический состав: никель – 50 %, кобальт – 30%, вольфрам – 15%, молибден – 4,5 %; применение: детали современных ГТД. [2].

- 12Х18Н10Т (AISI 321) химический состав: железо – 70%, углерод – 0,12%, хром – 17–19%, никель 9–11%, титан 0,8%. [3]

- РН 1 (ВНЛ 14) химический состав: углерод – 0,07%, хром – 14–15,5%, никель 3,5–5,5%, медь 2,5 – 4,5%, марганец – до 1%. [4].

Эти сплавы используются для изготовления деталей, применяемых в приборостроении, машиностроении, авиастроении. Данные сплавы имеют множественные аналоги, как в печати в виде порошков, так и в виде различных прокатных заготовок. Поэтому исследование эффективности на этих сплавах будет актуально и при традиционном производстве. Помимо этого, выбор так же обусловлен тем, что все эти сплавы обрабатываются одним и тем же сульфатным электролитом, без изменения состава и концентрации. В качестве электролита использовался раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с массовой долей в растворе 5%.

В качестве меры эффективности будет выступать сравнение шероховатости изделий (Параметр R_a в мкм) до начала обработки и после ее завершения в течении 1 минуты. К абсолютному большинству изделий предъявляется требование по уровню шероховатости поверхности, потому данный критерий для оценки качества обработки является определяющим. Для изучения шероховатости были выбраны траектории замеров с длиной трассы 6,5 мм.

При проведении обработки сплавов не изменялись показатели напряжения, состав и концентрация электролита, время обработки. Пробные образцы (детали) изготавливаемы из этих сплавов используются в закаленном виде, потому возникла необходимость в оценке влияния фактора термообработки на процесс ЭПО. Результаты обработки были представлены в таблице замеров шероховатости.

Таблица 1 – Результаты замеров шероховатости (мкм)

Состояние материала	ВЖ159		12X18H10T (AISI 321)		PH 1	
До термической обработки	До	После	До	После	До	После
	11,0	0,908	11,4	3,92	11,9	1,30
После термической обработки	До	После	До	После	До	После
	11,7	1,06	12,2	4,97	11,7	1,63

Из полученных результатов шероховатости следует, что скорость обработки поверхности напрямую зависит от коррозионной стойкости сплава, скорости химического травления и наличия термической обработки.

Анализируя полученные данные шероховатости был сделан вывод, что скорость обработки поверхности напрямую зависит от скорости химического травления материала, которая, в свою очередь зависит, от коррозионной стойкости сплава. Исходя из этого можно сделать промежуточный вывод, что чем выше коррозионная стойкость материала, тем больше времени требуется на его обработку. Этим объясняется высокая скорость обработки сплава ВЖ 159 в сравнении с 12X18H10T, который из-за своей высокой коррозионной стойкости применяется в химической и пищевой промышленности.

Так же был сделан вывод, что для достижения шероховатости поверхности порядка, $R_a = 1$ мкм для сплава 12X18H10T необходимо увеличить время обработки в 4 раза (до 4 минут), для PH 1 в 1,5 раза (до 1,5 минут).

Для деталей прошедших термическую обработку следует дополнительно увеличить время обработки:

- в 1,25 раза (до 5 минут) для сплава 12X18H10T,
- в 1,22 раза (до 2 минут) для PH 1
- в 1,16 раза (до 1,5 минут) у ВЖ159.

Данные коэффициенты получены экспериментально. Ввиду этого рекомендуется проводить ЭПО до отправки деталей на термическую обработку. После процесса термической обработки необходимо провести повторную полировку/очистку поверхности, что позволит избавить поверхность детали от оксидов.

Подводя итог, на основе полученных данных о шероховатости поверхности изделий, изготовленных аддитивным методом - сделан вывод о необходимости проведения тестов для всех обрабатываемых

материалов, чтобы иметь представление о фактической скорости процесса ЭПО, что требуется для составления технологических карт в условиях реальных производств и оптимизации сопутствующих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Д. Белов, А.А. Терентьев, К.Ю. Нагулин, А.Х. Гильмутдинов. Струйная электролитно-плазменная обработка как способ полировки поверхности сложнопрофильных изделий аддитивного производства // III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур». – 2022. – №3. – С. 377-380. – Текст.
2. К.Ю. Нагулин, А.А. Терентьев, М.Д. Белов, А.Х. Гильмутдинов. Струйная электролитно-плазменная постобработка деталей газотурбинных двигателей, изготовленных аддитивными методами // известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – №4. – С. 166-173.
3. ТУ 14-131-1042-2008 Прутки-прессизделия из жаропрочного сплава ХН58МБЮ-ИД (ЭК171-ИД, ВЖ159-ИД). - URL: <https://russkijmetall.ru/splav/#:~:text=Сплав%20ВЖ159.,%3В%20применение%3А%20детали%20современных%20ГТД> (дата обращения: 24.11.2024). – Текст: электронный.
4. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 марта 2014 г. N 65-П): Дата введения 01.01.2015.
5. Electro Optical Systems Robert-Stirling-Ring 1 D-82152 Stainless Steel PH1 for EOSINT M 270 // FATHOM Advanced Manufacturing URL: <https://rt-ecat.ru/f/ph1.pdf> (дата обращения: 24.11.2024).

УДК 541.183:544.725

D.K. Khandamova, PhD assistant;
Sh.P. Nurullaev, Professor;
Z.S. Alixonova, Associate professor;
O.O. Babaev, doctoral student
(Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan)

ISOTHERMAL MODELS OF ADSORPTION OF IRON IONS BY ORGANO-BENTONITES IN

Introduction. The contamination of water resources with iron (Fe^{2+}) ions is a significant environmental problem due to its negative impact on human health and aquatic ecosystems. Traditional water treatment methods often fail to effectively remove Fe^{2+} ions [1, 2]. In recent years, researchers have investigated the use of bentonite-based adsorbents as a promising

method for removing Fe^{+2} . Consequently, it has been determined that utilizing activated bentonites for purifying Fe^{+2} ions in wastewater (including sewage) offers several advantages due to its unique properties [3,4].

Research methods. The object of the study is Navbakhor bentonite (PBG brand), which is considered a local raw material, modified with organic substances such as trimethylammonium (TMAB) and triethylammonium (TEAB), and the adsorption properties of iron ions in aqueous solutions were studied.

Analysis of the obtained results. Adsorbents were weighed on analytical scales in an amount of 5 grams, placed in a solution prepared in the presence of 500 ml of iron sulfate at various concentrations, mixed, settled for 1 hour, and filtered. The total iron concentration was determined by the spectrophotometric method. The essence of the method lies in the fact that iron (III) oxide is quickly reduced to iron (II) oxide in an alkaline environment. This determines the total amount of iron (II) and iron (III) ions ($\lambda=420$ nm) in an alkaline medium. [5]. The adsorption isotherms of iron ions in solution using synthesized adsorbents were studied using the Freundlich, Langmuyr, Dubinin-Radishkovich, and Temkin isotherm models. Using these models, the adsorption data was analyzed and the main parameters of the adsorption process were determined (Fig.1). According to the obtained results, the adsorption of Fe^{+2} ions on the adsorbents was 0,111 mg/g in PBG bentonite, 0,164 mg/g in TMAB and 0,198 mg/g in TEAB, respectively. Analysis using the Freundlich model. The Freundlich equation, or Freundlich adsorption isotherm, is an adsorption isotherm that represents the empirical relationship between the amount of gas adsorbed on a solid surface and the gas pressure. The same relationship holds for the concentration of solute adsorbed on the surface of a solid and for the concentration of solute in the liquid phase. In 1909, Herbert Freundlich gave an expression describing the isothermal change in the adsorption of the amount of adsorbed gas per unit mass of a solid adsorbent with gas pressure[6]. The results of adsorption of Fe^{2+} ions on modified adsorbents using the Freundlich model are presented in Figure 2.

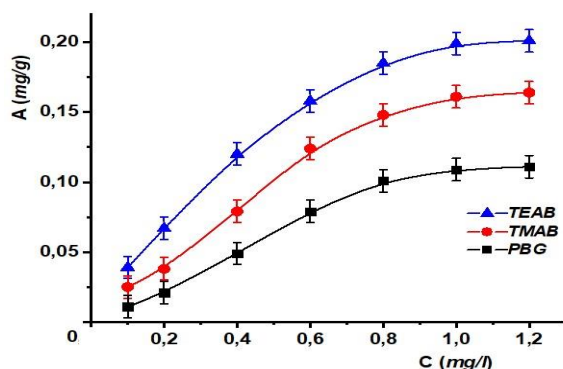


Figure 1 – Isotherms of adsorption of iron ions on adsorbents at 303K

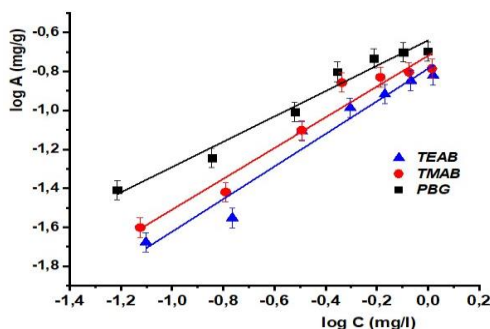


Figure 2 – Isotherms of adsorption of iron ions on adsorbents at a temperature of 303°C according to the Freundlich model

The Freundlich isotherm model indicates good adsorption at $0 < 1/n < 1$. In this case, the degree of adsorption decreases with increasing concentration. The values of $1/n$ in PBG, TMAB, and TEAB adsorbents are 0.836, 0.789, and 0.65, respectively, and the values of n are greater than 1 (PBG = 1.19, TMAB = 1.53, TEAB = 1.26). When $n > 1$, it means that adsorption is strong, in this case, adsorption efficiency decreases with increasing concentration. The parameters of the Freundlich model isotherms are given in Table 1.

Analysis using the Langmuir model. Langmuir's adsorption model explains adsorption by assuming that the adsorbate behaves as an ideal gas under isothermal conditions. According to the model, adsorption and desorption are reversible processes. His theory began when he put forward the idea that gaseous molecules do not return from the surface elastically, but are held up similarly to the groups of molecules in solids. The Langmuir isotherm model describes the main characteristics of adsorption isotherms, namely monolayer adsorption and the proximity of the adsorbent to the adsorbate.

The correlation coefficients (R^2) according to the Langmuir model were 0.921 for PBG, 0.964 for TMAB, and 0.947 for TEAB. In the Langmuir model, $R (L)$ (or separation coefficient, separation factor) is an important parameter representing the ease of adsorption. It describes how adsorption occurs depending on the initial adsorbate concentration according to the adsorption isotherms. The value of $R (L)$ is interpreted as follows: $R (L) > 1$: The adsorption process is unfavorable, $R (L) = 1$: The adsorption process is linear (ideal state), $0 < R(L) < 1$: The adsorption process is favorable, which indicates good adsorption, $R (L) = 0$: The adsorption process is irreversibly strong. The study found that the isotherm of the Langmuir model has a separation coefficient ($R (L)$) of 0.26, 0.197, and 0.104, respectively. The results of the Langmuir model isotherm are presented in Table 1. Analysis using the Dubinin-Radushkevich model. The Dubinin-Radushkevich model is often used to estimate characteristic porosity and the visible free energy of adsorption. The Dubinin-

Radushkevich (D-R) adsorption isotherm model is based on the potential theory of adsorption developed by Polanyi. Due to its basic thermodynamic basis, it is fundamentally strong and highly valued compared to other isothermal models. In the Dubinin-Radushkevich isotherm model, the E value is stated to fall within the energy range of 8-16 kJ/mol for ion exchange adsorption.

The values of the constants are determined by the intersection of the linear model ($q_{\max} = \exp(\text{intercept})$) and the slope of the tangent of the angle (KD-R=-slope). In the literature, the value of E is emphasized as a criterion for evaluating the type of adsorption process. If the value of E is greater than 16 kJ/mol, the adsorption is chemisorption. If the value of E is less than 8 kJ/mol, it corresponds to a physical adsorption process. If it falls within the range of 8-16 kJ/mol, it indicates that ion exchange adsorption is occurring. The values of the Dubinin-Radushkevich model constants for Fe^{2+} ion adsorption isotherms on PBG, TMAB and TEAB are presented in Table 1.

Table 1 – Indicators of Fe^{2+} ion adsorption on adsorbents based on Freundlich, Langmuir, Dubinin-Radushkevich, and Temkin isotherm models

Adsorbition Isotherm Models	Parameters	Adsorbents		
		PBG	TMAB	TEAB
Lengmyur	$q_{\max}$ (mg/g)	0.206	0.235	0.239
	K_L (L/mg)	0.056	0.081	0.171
	R_L	0.261	0.197	0.104
	R^2	0.997	0.998	0.999
Freyndlix	K_F (1/mg)	0,163	0.191	0.229
	1/n	0,836	0.789	0.650
	n	1,196	1.267	1.538
	R^2	0.917	0.964	0.947
Temkin	B_T (J/mol)	13.354	19.541	26.052
	K_T (L/mg)	0.055	0.056	0.063
	R^2	0.969	0.989	0.961
Dubinin- Radushkevich	q_m (mg/g)	4.362	4.636	5.214
	β_d (mol ² /kJ ²)	$1.23 \cdot 10^{-4}$	$1.86 \cdot 10^{-5}$	$3.09 \cdot 10^{-6}$
	E (kJ/mol)	34.4	56.9	65.4
	R^2	0.834	0.881	0.865

The Temkin isotherm model considers the influence of the indirect adsorbate-adsorbent interaction on the adsorption process. It is based on the assumption that the heat of adsorption of all molecules in the layer decreases linearly due to an increase in the surface coverage of the adsorbent. The decrease in the heat of adsorption is linear, not logarithmic, as in the Freundlich isotherm. According to the results, the correlation coefficient for this isotherm was 0.989 for TMAB. The adsorption isotherms of Fe^{2+} ions on PBG, TMAB and TEAB adsorbents are presented in the table below. Based on the conducted research, the correlation coefficients in the

Langmuir model were more accurately described than in the Freundlich, Temkin, and Dubinin-Radushkevich models.

According to Langmuir's model, the adsorption capacity ($q_{\max}$) of adsorbents in PBG is 0.206; 0.235 - in TMAB; 0.239 mg/g – in TEAB.

Conclusion. Based on the conducted studies, the Langmuir model provided a more accurate description of Fe^{2+} ion adsorption compared to the Freundlich, Temkin, and DubininRadushkevich models. The adsorption capacities ($q_{\max}$) of the synthesized adsorbents were determined to be 0.206 mg/g for PBG, 0.235 mg/g for TMAB, and 0.239 mg/g for TEAB. Fe^{2+} ion adsorption values were found to be 0.151 mg/g for PBG, 0.164 mg/g for TMAB, and 0.168 mg/g for TEAB.

REFERENCES

1. Gouider, M., Feki, M., & Majdoub, H. (2018). Iron contamination in drinking water and its treatment methods. *Environmental Technology*, 40(13), 1645–1657.
2. Drosos, M., et al. (2021). "Phosphate and Ammonium Removal from Wastewaters Using Natural-Based Innovative Bentonites." *Molecules*, 26(21), 6684.
3. Kurniawan, T. A., et al. (2020). "Bentonite-Based Composites for Wastewater Treatment." *Journal of Environmental Management*, 261, 110234.
4. Tawfik A. Saleh , Mujahid Mustaqeem, Mazen Khaled ° Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* Volume 17, May 2022, 100617 <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>
5. Mazumdar, A., & Mazumdar, P. (2021). "Determination of Total Iron Content in Water Using UV-Vis Spectroscopy." *Journal of Environmental Chemical Analysis*, 43(2), 112-118.
6. Nidheesh, P. V., & Gandhimathi, R. (2012). Electrocoagulation process for the treatment of textile wastewater containing Fe^{2+} . *Separation and Purification Technology*, 98, 57-64.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА ПРИ ОСАЖДЕНИИ СПЛАВА ЖЕЛЕЗО-КОБАЛЬТ

Совершенствование методов получения наноструктурированных систем на основе переходных металлов является одной из актуальных проблем материаловедения в связи с расширяющейся областью их практического применения. Материалы из сплавов железо-кобальт используются в областях, связанных с электронными и магнитными устройствами [1]. Также находят применение как катализаторы [2] или коррозионностойкие материалы [3]. В связи с современными требованиями к эффективности и экологичности гальванических технологий представляет интерес использование импульсных режимов электролиза для получения функциональных материалов [4,5]. Целью настоящей работы было исследовать влияние параметров электролиза на формирование сплава железо-кобальт из кислого глицинатного раствора.

Рабочий раствор содержал сульфат железа (II) 0,35 М, сульфат кобальта (II) 0,15 М, хлорид калия, глицин, борную кислоту. Величина $pH = 2,85 \pm 0,05$ исследуемых растворов измерялась иономером И-160МП. В качестве рабочего электрода использовали сталь 08КП, латунь Л63. Электрохимические исследования выполнены на потенциостате Р-150. Осадки Fe-Co получали толщиной 10 ± 1 мкм. Состав электроосажденного сплава определяли рентгенофлуоресцентным методом с помощью портативного анализатора X-MET 7500 с точностью $\pm 0,005\%$. Для определения выхода по току (ВТ) электроды взвешивались до и после осаждения покрытия на весах Pioneer PA64C с точностью до 0,0001 г. Микротвердость измеряли с помощью ПМТ-3.

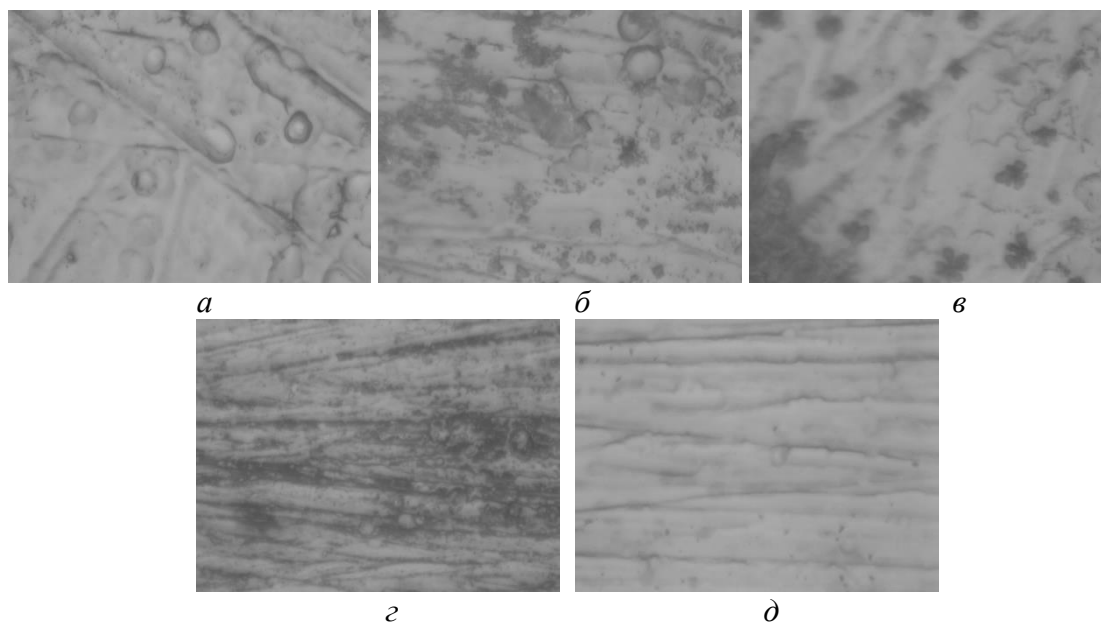
При осаждении покрытия в стационарном режиме электролиза был сформирован сплав Fe-Co с преимущественным содержанием в своем составе железа (табл.1). Побочная реакция выделения водорода оказала влияние как на морфологию покрытия (рис.1а), так и на эффективность электроосаждения: ВТ = $\sim 65\%$. Величина микротвердости (HV) покрытия составила ~ 220 кг/мм², что значительно превышает HV стальной основы (~ 85 кг/мм²).

В работе изучали влияние наложения импульсов анодного тока (τ_A) на формирование и свойства покрытий Fe-Co. Применение полупериодов анодного тока и повышение его величины способствовало

увеличению содержания в сплавах кобальта (табл.). Выход по току (ВТ) осадков незначительно уменьшался при наложении τ_A и повышении анодного тока, соответственно. Реверсивный режим формирования значимо не повлиял на значение HV покрытий. Однородность поверхности образцов сплавов снизилась. На поверхности осадков были отмечены микроуглубления, появившиеся, видимо, вследствие селективного подрастворения сплава Fe-Co (рис.1б,в).

Таблица – Влияние режима электролиза на свойства сплавов Fe-Co

Режим	Состав, %		ВТ, %	HV, кг/мм ²
	Fe	Co		
$i_K 15 \text{ мА/см}^2$	78,8	21,2	65,4	222
$i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с},$ $i_A 5 \text{ мА/см}^2 \tau_A 1 \text{ с}$	76,8	23,2	64,9	219
$i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с},$ $i_A 10 \text{ мА/см}^2 \tau_A 1 \text{ с}$	73,3	26,7	59,1	221
$i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с}, i_A 0 \tau_{\Pi} 1 \text{ с}$	77,2	22,8	68,2	205
$i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с}, i_A 0 \tau_{\Pi} 0,1 \text{ с}$	78,3	21,7	71,6	209



$a - i_K 15 \text{ мА/см}^2$; $б - i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с}, i_A 5 \text{ мА/см}^2 \tau_A 1 \text{ с};$
 $в - i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с}, i_A 10 \text{ мА/см}^2 \tau_A 1 \text{ с};$ $г - i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_K 12 \text{ с}, i_A 0 \tau_{\Pi} 1 \text{ с};$
 $д - i_K 15 \text{ мА/см}^2 \tau_{\Pi} 12 \text{ с}, i_A 0 \tau_{\Pi} 0,1 \text{ с}$

Рисунок 1 – Влияние режима электролиза на морфологию осадка Fe-Co, увеличение 1000 крат

Было проведено исследование влияния бестокового полупериода (τ_{Π}) на восстановление состава приэлектродного слоя раствора и осаждение сплава Fe-Co. Количество кобальта в сплаве при формировании в импульсном режиме повышалось менее значимо, чем в реверсивном режиме осаждения (табл.). При длительности полупериодов

тока (τ_k) менее 8 с ВТ образцов превышал 100 %, что может быть связано с включением в гальванический осадок компонентов приэлектродного слоя раствора. При длительности τ_k более 10 с ВТ осадков незначительно превышал значение ВТ образцов, полученных в стационарном режиме электролиза. Формировались менее твердые (табл.) и более равномерные покрытия (рис.12,д) по сравнению со стационарным и реверсивным режимом электролиза.

Полученные образцы гальванических покрытий были исследованы на коррозионную стойкость (K_m) в 3%-ном растворе NaCl в течение суток. Формирование покрытий как в реверсивном, так и в импульсном режиме осаждения позволило незначительно повысить K_m образцов до $0,20 \pm 0,02 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ по сравнению с $K_m = 0,24 \pm 0,02 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ покрытий, осаждённых в стационарном режиме электролиза.

Таким образом, применение нестационарного режима электролиза позволяет повысить качество сплавов Fe-Co. Реверсивный режим способствует повышению содержания кобальта в сплаве. В импульсном режиме электролиза формируется наиболее однородная морфология покрытий сплавом Fe-Co.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rizal C., Kolthammer J., Pokharel R.K., Choi B.C. Magnetic properties of nanostructured Fe-Co alloys // *Journal of Applied Physics*. 2013. V. 113. № 11. 113905.
2. Oliveira F.G.S., Bohn F., Correia A.N., de Lima-Neto P., Vasconcelos I.F. Fe-Co coatings electrodeposited from eutectic mixture of choline chloride-urea: physical characterizations and evaluation as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 851. 156330.
3. Sutthiruangwong S., Chansena A. Corrosion behavior of electrodeposited Co-Fe alloys in aerated solutions // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 429. P. 251-256.
4. Никитин В.С., Останина Т.Н., Рудой В.М. Модельное описание процесса электроосаждения рыхлых осадков цинка в импульсных режимах потенциала // *Электрохимия*. 2024. Т.60. № 2. С.124-138.
5. Парасотченко Ю.А., Суздальцев А.В., Зайков Ю.П. Стационарное и импульсное электроосаждение кремния в расплаве LiCl-KCl-CsCl-K₂SiF₆ // *Расплавы*. 2024. № 4. С. 377-390.

К.С. Никитин, асп. (ИХР РАН, г. Иваново);

О.В. Мальцева, канд. хим. наук, науч. сотр. (ИХР РАН, г. Иваново);

Н.Ж. Мамардашвили, д-р хим. наук, зав. отделом (ИХР РАН, г. Иваново);

А.И. Смирнова канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.;

Н. В. Усольцева д-р хим. наук, директор НИИ наноматериалов
(НИИ наноматериалов, ИвГУ, г. Иваново)

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАВАЮЩЕГО СЛОЯ ДИФЕНИЛПОРФИРИНА

Порфирины представляют собой широко распространенный класс циклических полиаминов, состоящих из четырех пиррольных колец, объединенных с помощью метиновых мостиков ($-\text{CH}=\text{}$). Молекулы порфиринов играют важную роль в живых системах, так как являются ключевыми компонентами таких биологических молекул, как хлорофилл, гем крови, цитохромы, миоглобины и витамин B_{12} . Целью данного исследования стало изучить процесс формирования плавающего слоя 5,15-дифенилпорфирина, в том числе в процессах компрессии-декомпрессии на границе раздела воздух/вода.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования был выбран коммерчески доступный 5,15-дифенилпорфирин, фирма-производитель – Sigma-Aldrich (Рис. 1).

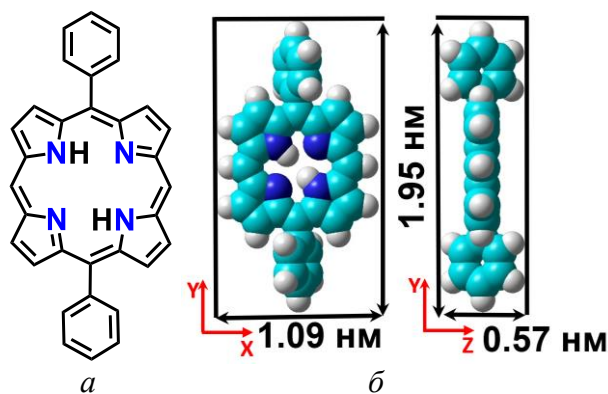


Рисунок 1 – Химическая структура 5,15-дифенилпорфирина (а)
и ее модель (б)

Структура порфирина была рассчитана с использованием пакета программ *Gaussian 09* (метод DFT с использованием B3LYP функционала и базисного набора 6-31G). При помощи программы *ChemCraft* были определены площади проекций молекулы порфирина. Площадь, занимаемая молекулой на поверхности субфазы была оценена на основе геометрической модели в положениях *face-on* ($A_{\text{proj}(\text{face})} = 1.10 \text{ нм}^2$) и *edge-on* ($A_{\text{proj}(\text{edge})} = 0.45 \text{ нм}^2$) относительно поверхности раздела

воздух/вода. Значения площадей на молекулу в плотноупакованном плавающем слое в *face-on* ($A_{\text{pack}(\text{face})} = 1.49 \text{ нм}^2$) и *edge-on* ($A_{\text{pack}(\text{edge})} = 1.00 \text{ нм}^2$) ориентациях относительно поверхности раздела воздух/вода, определяли с использованием подходов, опубликованных в работе [1]. Ориентация молекул в плавающих слоях была определена путем сравнения вычисленных значений $A_{\text{pack}(\text{face})}$ и $A_{\text{pack}(\text{edge})}$ с средней площадью на молекулу в слое (A_{mol}).

Плавающий слой порфирина получали из раствора в хлороформе ($C = 10^{-4} \text{ М}$) на ванне LT-211 фирмы ОДО «Микротестмашины» (Гомель, Беларусь). Раствор исследуемого соединения наносили на поверхность бидистиллированной воды при температуре $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Слой через 15 мин после нанесения раствора сжимали со скоростью $55 \text{ см}^2/\text{мин}$. Поверхностное давление измерялось при помощи весов Вильгельми с точностью $0.01 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$. Объем наносимого раствора определяли в соответствии с требуемой начальной степенью покрытия поверхности (c_{face}), т.е. отношением площади, занимаемой молекулами вещества, к общей площади поверхности воды. При нанесении раствора степень покрытия поверхности молекулами составляла $c_{\text{face}} = 69\%$. Скорость компрессии/декомпрессии плавающих слоев составляла $55 \text{ см}^2/\text{мин}$.

Процесс формирования плавающего слоя изучали *in situ* методом микроскопии под углом Брюстера на установках Optrel 300 (Финляндия) и KSV Minitrough (KSV Instruments, Финляндия). В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм и мощностью 10 мВт . С помощью гониометра на микроскопе устанавливали угол падения лазерного луча в диапазоне от 45° до 75° с точностью 0.01° . Для получения высококонтрастных изображений использовались высокоточные поляризаторы с коэффициентом поляризации 10^{-8} . Изображения увеличивались с помощью сменных объективов ($\times 5$, $\times 10$ и $\times 20$) и записывались на управляемую компьютером камеру с разрешением 768×72 пикселей, пространственное разрешение 2 мкм .

Результаты и обсуждение

Изотерма сжатия плавающего слоя порфирина (Рис. 2а) демонстрирует резкое увеличение поверхностного давления в области $A = 0.87\text{--}0.36 \text{ нм}^2$, что свидетельствует о переходе из «жидкоконденсированного» в «конденсированное» фазовое состояние слоя [2]. Данное утверждение подтверждается изображениями угловой микроскопии Брюстера этого слоя, соответствующими различным областям изотермы сжатия. Еще до начала сжатия при 0 мН/м на поверхности субфазы можно наблюдать большое количество доменов

ненулевой толщины (Рис. 2б). При сжатии до давления 0.30 мН/м (Рис. 2а, точки 1-3) количество доменов возрастает, они объединяются и скорость их передвижения относительно поверхности субфазы уменьшается (Рис. 2б-г).

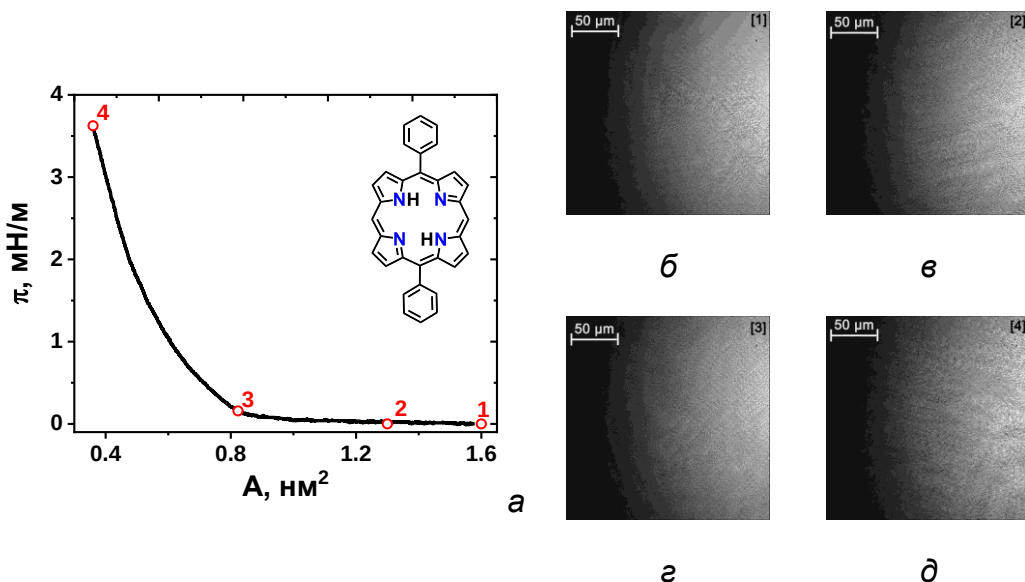


Рисунок 2 – Изотера сжатия (а) и микрофотографии угловой микроскопии Брюстера (б-д) плавающего слоя порфирина. Красными точками и цифрами на изотерме обозначены условия, при которых были получены микрофотографии: $A_1 = 1.60$ нм², $A_2 = 1.30$ нм², $A_3 = 0.82$ нм², $A_4 = 0.36$ нм²

В конце сжатия плавающего слоя (Рис. 2а, точка 4) вся поверхность субфазы занята доменами, скорость которых практически равна нулю, что свидетельствует об образовании «конденсированного» плавающего слоя порфирина (Рис. 2д). Анализ показал, что в конденсированном состоянии плавающего слоя молекулы порфирина находятся в *edge-on* ориентации.

Последовательные три цикла компрессии-декомпрессии демонстрируют смещение изотерм сжатия в сторону больших значений средней площади на молекулу (Рис. 3). Детальный анализ петли гистерезиса плавающего слоя порфирина в первом цикле компрессии-декомпрессии показал, что формируется слой с сильными межмолекулярными взаимодействиями ($A^{hys} = 0.3 \cdot 10^{-21}$ Дж) [2]. Во втором цикле компрессии-декомпрессии по сравнению с первым наблюдалось увеличение энергии формирования в 4.27 раза ($A^{hys} = 1.3 \cdot 10^{-21}$ Дж), в третьем – в 6.27 раза ($A^{hys} = 1.9 \cdot 10^{-21}$ Дж).

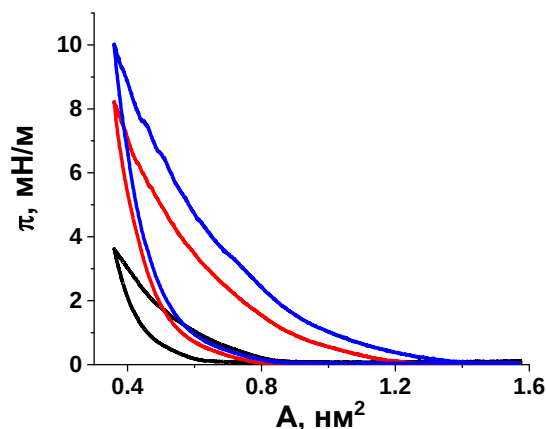


**Рисунок 3 – Три последовательных циклов компрессии-декомпрессии плавающего слоя порфирина
Первый цикл (черная линия), второй (красная) и третий (синяя)**

Следует отметить, что уменьшение числа фенильных заместителей до двух (5,15-дифенилпорфирин) существенно повлияло на формирование плавающего слоя по сравнению с ранее исследованным нами 5,10,15,20-тетрафенилпорфирином [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий ИХР РАН (№ 122040500043-7) и НИИ наноматериалов ИвГУ (№ FZZM 2023-0009).

Авторы выражают благодарность Марченковой М.А. за помощь в исследовании и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maiorova, L. Nanostructured Stable Floating M-Mono- and Bilayers and Langmuir-Schaefer Films of 5,10,15-Triphenylcorrole / L. Maiorova, T. T. Vu, O. A. Gromova et al. // BioNanoScience. – 2018. – Vol. 8, N 1. – P. 81-89. – DOI 10.1007/s12668-017-0424-0.
2. Nikitin, K.S. Tetrapyrrolic macrocycles self-organization into floating layers and sensory properties of their Langmuir-Schaefer films / K.S. Nikitin, O.V. Maltceva, N.Z. Mamardashvili et al. // Journal of Molecular Structure. – 2025. – Vol. 1321. – P. 140244. – DOI 10.1016/j.molstruc.2024.140244.

ОЧИСТКА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Гальваническое производство нашло широкое применение на ремонтных предприятиях для восстановления изношенных деталей машин и механизмов. Гальваническое производство является одним из самых водоемких. Основными загрязнителями сточных вод гальванических участков и цехов ремонтных предприятий являются ионы тяжелых металлов, которые относятся к приоритетным загрязняющим веществам, наблюдения за которыми обязательны во всех странах. Ежегодно огромное количество тяжелых металлов, прежде всего таких как, медь, свинец, хром, никель, цинк, кадмий и другие, попадают в окружающую среду и нарушают баланс в экосистеме [1]. Многочисленные исследования показывают, что ионы тяжелых металлов проявляют весьма высокую биологическую активность, накапливаясь в человеческом организме. Тяжелые металлы и их соединения считаются чрезвычайно опасными токсинами в сточной воде [2].

Загрязнение сточных вод токсичными веществами и промышленными отходами затрудняет или делает невозможным использование водоемов в качестве источников питьевого или технического водоснабжения. Так как способность естественных водоемов к самоочищению не беспредельна, то превышение норм загрязнений, допустимых к сбросу в водоем, может привести к необратимым изменениям и гибели водоема.

Только использование эффективных малоотходных технологий сможет существенно снизить техногенное воздействие на окружающую среду. Наиболее целесообразным решением экологической проблемы является создание замкнутых систем водопользования.

Цель исследования: провести обзор современных методов очистки сточных вод гальванического производства от ионов тяжелых металлов, выявить их достоинства и недостатки, выбрать наиболее эффективный, позволяющий получить высокий эффект очистки воды с использованием её в замкнутой системе промышленного водопользования.

Из всего разнообразия методов очистки стоков наиболее эффективны четыре: реагентный, ионообменный, электродиализный, электрохимический [1,3-5].

В настоящее время при очистке сточных вод, содержащих тяжелые металлы, наибольшее распространение получил реагентный метод. Суть реагентного метода очистки сводится к тому, что обез-

вреживание сточных вод достигается путем их обработки химическими реагентами, действие которых переводит токсические вещества в нетоксические или приводит к выделению загрязнений в осадок, который затем отделяется от очищенной воды. Этот метод включает в себя процессы нейтрализации, окислительно-восстановительные реакции, осаждение и обезвоживание, образующегося осадка, и позволяет довольно полно удалять из стоков ионы тяжелых металлов [1].

Недостатками реагентного метода являются: высокая стоимость и большой расход реагентов (в том числе агрессивных); повторное загрязнение очищенных вод, что исключает ее возврат в цикл оборотного водопользования; утрата ценных веществ и затруднение их переработки; образование большого количества осадков; сложность и громоздкость аппаратуры для ведения реакции и выделения осадка.

Ионообменный метод очистки основан на использовании некоторых твердых, практически не растворимых в воде материалов – ионитов, обладающих свойствами обменивать входящие в их состав ионы на ионы, содержащиеся в растворе.

Ионообменный метод позволяет утилизировать практически все тяжелые металлы: хром, медь, цинк, никель и др. Применение этого способа весьма перспективно, но высокая стоимость ионообменных смол, ограниченность их выпуска, сдерживают их внедрение в производство [3].

Сущность электродиализного способа состоит в фильтрации через анион проницаемую и катион проницаемую диафрагмы ионов солей тяжелых металлов под действием проходящего через раствор электрического тока. Данный способ позволяет вновь получать кислоты и щелочи.

Недостатки способа – необходимость предварительной тщательной очистки стоков от механических примесей и коллоидных частиц, которые могут засорять диафрагму; дефицитность и высокая стоимость диафрагм [3]. Электрохимические методы зарекомендовали себя как эффективные и прогрессивные технологии очистки воды. Установки по реализации этих методов достаточно компактны, высокопроизводительны, процессы управления и эксплуатации сравнительно просто автоматизируются. Наибольшее распространение получили электрофлотация, электрокоагуляция и гальванокоагуляция [3-6].

Наиболее перспективным является метод электрокоагуляции [6], который получил широкое распространение, особенно для хромосодержащих стоков. Так, 29 КТЦ (Санкт - Петербург) разработана электрокоагуляционная установка 029.4944-01, которая позволяет выполнять глубокую очистку гальванических стоков от ионов тяжелых металлов.

Техническая характеристика установки:

ПДК загрязнений в растворах, сбрасываемых на очистку:	
маслянистых, г/л	12
твердых, г/л	15...20
содержание Cr^{6+} , мг/л	20...25
pH	5,5
Допустимая остаточная концентрация загрязнений после очистки:	
маслянистых, г/л	-
твердых, г/л	1...2
содержание Cr^{6+} , мг/л	0,05
pH	6,5...8,5
Средняя производительность установки, м ³ /ч	3
Установленная мощность, кВт	63
в том числе электрокоагулятора	52
Габаритные размеры, мм	
длина	6700
ширина	4600
высота	4060

Как видим, содержание Cr^{6+} в очищенных стоках составляет 0,05 мг/л, в то время, как в оборотных водах промышленных предприятий концентрация Cr^{6+} допускается до 1,7 мг/л. Электрокоагуляционный метод позволяет приблизиться к решению проблемы безотходных циклов в гальваническом производстве при сравнительно небольшой стоимости обработки промышленных стоков, полностью окупаемой возвращаемой в производство водой. Данная установка входит в замкнутую систему промышленного водопользования (ЗСПВ) и успешно используется на ряде авторемонтных предприятий. Замкнутое водоснабжение предприятий – один из немногих путей защиты окружающей среды от загрязнений и единственный путь для рационального промышленного использования водных ресурсов.

Выводы. Создание безотходных гальванических производств является важнейшей задачей, необходимость решения которой обусловлена губительным воздействием на окружающую среду сбросов с низким качеством их очистки. Одной из главных задач в деле предотвращения загрязнения окружающей среды в настоящее время и в перспективе является экономное и рациональное использование водных ресурсов, способное обеспечить полную сохранность и восстановление вод. С этой целью необходим перевод промышленности на оборотную (замкнутую) систему водоснабжения, исключающую сброс загрязненных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев Р.А., Бурдова М.Г., Гришина И.В. Сравнительный анализ очистки стоков гальваники при реагентном и электрохимиче-

ском способах обработки / Р.А. Ковалев, М.Г. Бурдова, И.В. Гришина // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С.343-346.

2. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов / В.Н. Майстренко, Р.З. Хамитов, Г.К. Будников. М.: Химия. 1996. 319 с.

3. Филатова Е.Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. № 2 (13). С.97-109.

4. Колесников В. А., Ильин В. И., Бродский В. А., Колесников А. В. Электрофлотация в процессах водоочистки и извлечения ценных компонентов из жидких техногенных отходов. Обзор // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 5. № 4. С. 361–375.

5. Гладких С.Н. Очистка гальванических стоков ремонтных предприятий. Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной Всенородному дню гражданской обороны : в 3 ч. Ч. II. Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.– М. : Академия ГПС МЧС России. 2019. С.104-108.

6. Гладких С.Н. Очистка гальванических стоков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщений. Научно-технический журнал. №1 (46). 2019. С.21-23.

УДК 628.316.12

А.А. Извекова, асп.;

Е.Ю. Квиткова, науч. сотр., канд. хим. наук;

А.А. Гущин, проф., д-р хим. наук

(Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия)

ОЧИСТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ХЛОРАМФЕНИКОЛА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

Загрязнение водоемов потенциально опасными веществами, включая фармацевтические препараты (ФП) и средства личной гигиены, остается одной из актуальных проблем современности, вызывающей серьезное беспокойство у научного сообщества и экологических организаций [1]. Первые случаи обнаружения ФП в водной среде и питьевой воде датируются 1980-ми годами [2]. С течением времени количество таких исследований увеличивается, подтверждая распространение данных веществ и их потенциальное воздействие на экосистемы и здоровье человека [3].

Основными путями проникновения ФП в окружающую среду являются использование населением фармацевтических препаратов,

утилизация через канализационные системы, сбросы сточных вод фармацевтическими предприятиями, а также дренаж медицинских отходов. Исследования показывают, что традиционные методы очистки стоков недостаточно эффективны для удаления ФП, что ведет к попаданию загрязняющих веществ в водоемы без надлежащей обработки.

Например, некоторые широко распространенные лекарственные средства, такие как ибупрофен, парацетамол, а также антибиотики левомицетин и тетрациклин, встречаются в значительных концентрациях в поверхностных водах, что создает серьезные риски для экологической безопасности и здоровья населения. Согласно результатам крупного исследования, проведенного учеными Йоркского университета, наиболее распространенным ФП являются гормоны и антибиотики, которые были обнаружены в 75% изученных проб благодаря их широкому применению и стойкости к разложению [4].

Усугубляет проблему тот факт, что многие из этих соединений характеризуются низкой биоразлагаемостью и способны аккумулироваться в водных источниках, создавая долговременную угрозу. Дополнительно возрастает риск появления устойчивых к антибиотикам бактерий из-за наличия остаточных количеств лекарств в водной среде. Современные технологии водоочистки пока не обеспечивают полного удаления данных соединений из сточных вод [5], поэтому необходимы инновационные подходы к нейтрализации фармацевтических примесей в стоках. В частности, плазменные технологии, включая применение диэлектрического барьерного разряда (ДБР), считаются перспективным методом для эффективной очистки воды от фармацевтических загрязнений [6].

Плазмохимические технологии относятся к современным окислительным методам, которые основаны на использовании высокоактивных гидроксильных радикалов и имеют высокую эффективность удаления органических соединений из воды.

В данной работе рассмотрена возможность применения ДБР для очистки воды от ФП (на примере хлорамфеникола). Хлорамфеникол (Торговое название – левомицетин) – антибиотик широкого спектра действия. Для приготовления модельных растворов использовался левомицетин, выпускаемый ЗАО «Производственная фармацевтическая компания Обновление».

Эксперимент проводился на установке, основным элементом которой является плазмохимический реактор с коаксиальным расположением электродов, описание конструктивных особенностей и принципа действия которого приведено в работе [6]. Оптимальными условиями обработки водных растворов хлорамфеникола в плазме диэлектрического барьерного разряда, являются: приложенное к элек-

тродам напряжение – 13 кВ (вкладываемая мощность в разряд – 11,61 Вт), время контакта раствора с зоной разряда – до 5 секунд.

Содержание хлорамфеникола в пробах осуществлялось путем его извлечения из водных растворов методом экстрагирования органическим растворителем – этилацетатом с последующим спектрофотометрированием (спектрофотометр «UNICO, мод. 2804»).

Процесс деструкции хлорамфеникола в реакторе ДБР протекает достаточно эффективно (степень разложения достигает 85 %). Эффективность очистки водных растворов от хлорамфеникола (α) оценивалась по формуле:

$$\alpha(\%) = \frac{C_{\text{нач}} - C}{C_{\text{нач}}} \cdot 100 \quad (1)$$

где $C_{\text{нач}}$ и C – начальная концентрация хлорамфеникола на входе в реактор и на выходе из него соответственно.

Исследование показало, что степень деградации хлорамфеникола под воздействием ДБР при начальных концентрациях (C_0) в диапазоне от 9 до 45 мг/л достигает значений 70 % – 85 %. Константа скорости деградации хлорамфеникола (k), рассчитанная на основании кинетической модели для этого диапазона начальных концентраций, снижается вдвое – с $(0,30 \pm 0,03)$ до $(0,16 \pm 0,01) \text{ с}^{-1}$ по мере увеличения начальной концентрации. В то время как скорость процесса деградации W , которая определяется как $W = k \cdot C_0$, возрастает с 8,2 до 22,0 мкмоль/л·с.

Сравнение кинетики деградации хлорамфеникола с аналогичными показателями для парацетамола свидетельствует о большей устойчивости хлорамфеникола к разложению в ДБР [7].

Эффективность процесса деградации исследуемого препарата с точки зрения затрат энергии (число разложенных молекул на каждые 100 эВ потребленной энергии) варьируется в пределах от 0,002 до 0,006 молекул/100 эВ, что существенно меньше соответствующих показателей для парацетамола в аналогичных условиях (от 0,015 до 0,022 молекул/100 эВ) [7].

Анализ продуктов разложения хлорамфеникола в водной среде выявил присутствие альдегидов, карбоновых кислот, аммонийного азота, а также нитритных и нитратных ионов. Увеличение продолжительности воздействия плазмы на раствор привело к повышению уровня альдегидов, ионов аммония (NH_4^+) и нитратов (NO_3^-). Установлено, что от 12,2% до 25,3% углерода, входящего в состав левомицетина, превращается в CO_2 . Степень минерализации исходного соединения увеличивается прямо пропорционально снижению его начальной концентрации в растворе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что технология очистки сточных вод при помощи ДБР является перспективным мето-

дом для удаления фармацевтических веществ, таких как хлорамфеникол, из водных сред.

*Работа выполнялась в рамках государственного задания
на выполнение НИР: тема № FZZW-2023-0010.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Comber S. et al. Active pharmaceutical ingredients entering the aquatic environment from wastewater treatment works: a cause for concern? // *Science of the total environment*. – 2018. – Т. 613. – С. 538-547.
2. Richardson M. L., Bowron J. M. The fate of pharmaceutical chemicals in the aquatic environment // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 1985. – Т. 37. – №. 1. – С. 1-12.
3. Datel J. V., Hrabankova A. Pharmaceuticals load in the svihov water reservoir (Czech Republic) and impacts on quality of treated drinking water // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – No. 5. – P. 1387.
4. Wilkinson J. L. et al. Pharmaceutical pollution of the world's rivers // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2022. – Vol. 119. – No. 8. – P. e2113947119.
5. Yang H. et al. Residues, bioaccumulation, and trophic transfer of pharmaceuticals and personal care products in highly urbanized rivers affected by water diversion // *Journal of hazardous materials*. – 2020. – Т. 391. – С. 122245.
6. Gushchin A. et al. Reducing the Toxicity of Tetracycline Solutions and the Kinetics of Decomposition under the Action of DBD in Oxygen // *Plasma Medicine*. – 2019. – Vol. 9. – No. 2.
7. Ignatiev, A. A., Gushchin, A. A., Grinevich, V. I., Kvitkova, E. Y., Izvekova, A. A., & Rybkin, V. V. // *High Energy Chemistry*. 2023. 57(6), P. 522-526.

УДК 621.357

Е.О. Черник, соискатель, нач. отдела ОНТМ, НИиНИРС;
И.И. Курило, зав. кафедрой ФКиАХ, канд. хим. наук;
А.А. Черник, зав. кафедрой ХТЭХПиМЭТ, канд. хим. наук
(БГТУ, г. Минск)

ОСАЖДЕНИЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОРПУСА СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Благодаря относительной простоте, электрохимический способ получения композиционных покрытий нашел широкое применение и активно используется для изготовления алмазного стоматологического инструмента.

В композиционных покрытиях наиболее предпочтительно использования никеля, так как усилие отрыва частиц от никеля в 1,5–2,0 раза больше, чем от меди или от хрома.

Нанесение алмазно-гальванического слоя в настоящее время является достаточно известным процессом, позволяющим получать покрытие не только на инструменте любой конфигурации, но и на движущейся ленте. Для создания инструмента используются синтетические алмазы зернистостью от 28/20 до 1000/800 мкм.

Процесс нанесения алмазно-гальванических покрытий включает два основных этапа: на первом происходит прикрепление алмазных зерен к поверхности катода; на втором – закрепление их на требуемую высоту путем электроосаждения дополнительного слоя металлической связки. Далее идет процесс заращивания алмазных частиц, закрепленных на поверхности изделия.

Как правило, при получении алмазного стоматологического инструмента толщина осаждаемого металла составляет, в зависимости от зернистости алмазов, от десятков до сотен микрометров. Нанесение покрытий с такой толщиной сопряжено с рядом трудностей:

- во-первых, возможно образование дендритов;
- во-вторых, продолжительность получения инструмента может увеличиться до нескольких десятков часов.

Все эти факторы не способствуют улучшению качества и повышают стоимость продукции. Значительное улучшение качества осадков и ускорение процесса выделения металла возможно только при электролизе импульсным или реверсным током. Этим методом можно получить мелкозернистые блестящие осадки никеля в серноокислых растворах при высоких плотностях тока без использования блескообразующих добавок, что позволит сократить временные затраты и отказаться от операций «доработки» изделий и исправления брака, обусловленного образованием дендритов на отдельных участках обрабатываемой поверхности.

Применение нестационарных токовых нагрузок (периодический, импульсный, реверсный ток) в практике электроосаждения гальванических покрытий также позволяет существенно увеличить число переменных факторов при ведении гальванических процессов и, тем самым, расширить возможности управления свойствами получаемых покрытий.

В результате исследований установлено, что применение коротких импульсов тока длительностью от 2 до 20 мс совместно с паузами длительностью до 20 мс позволяет применять плотности тока до 40 А/дм². Данные параметры позволяют получать блестящие

никелевые покрытия с высокими скоростью и выходом по току. При этом электролит никелирования вообще не содержит блескообразующих добавок, так как импульсный ток выступает в качестве своеобразного блескообразователя, обеспечивающего необходимую поляризацию электрода за счет использования высоких амплитудных плотностей тока.

Экспериментальным путем нами установлено, что применение реверсного электролиза с плотностями тока в катодном и анодном импульсах до 50 А/дм^2 и длительностью импульсов до 10 мс позволяет осаждать покрытия толщиной до 400 мкм с отсутствием дендритообразования на острых кромках покрываемых поверхностей инструмента. Во всех случаях при использовании импульсного и реверсного режимов электролиза получено качественное блестящее покрытие с отсутствием дендритов, также при нестационарных режимах электролиза суммарное время осаждения никелевого покрытия уменьшалось в 5-10 раз, по сравнению со стационарным режимом.

УДК 544.6

В.В. Семёнов

(Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь)

РОЛЬ КАТИОНОВ МАРГАНЦА В ПРОЦЕССАХ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА ВОДНЫХ ЦИНК-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Положительные электроды водных цинк-ионных аккумуляторов на основе MnO_2 характеризуются сложным механизмом разряда, для которого характерно параллельное протекание интеркаляции цинка и катионов водорода в MnO_2 , а также восстановление атомов Mn (IV) до Mn(III,II) [1]. При последующем заряде происходит переосаждение диоксида марганца, который покрывает поверхность исходного электрода [2]. В результате этих процессов кривые разряда-заряда аккумулятора существенно изменяются в процессе работы. На рис. 1 представлены разрядные кривые для положительных, электродов, содержащих различные полиморфные модификации диоксида, а именно, α -, β - и δ - MnO_2 . Разрядные кривые в первом цикле содержат различное количество плато: одно для α - и β - MnO_2 , два – для δ - MnO_2 , а также отличаются напряжением разряда. К 50 циклу разряда различия между электродами снижаются и на всех кривых разряда проявляются два плато – при 1,45 В и 1,33–1,30 В. Два плато регистрируются и на кривой заряда.

Образование в растворе катионов $\text{Mn}_{(\text{p})}^{2+}$ при восстановлении MnO_2 в цинк-ионных аккумуляторах отвечает за снижение ёмкости аккумулятора на первых циклах разряда-заряда [4]. Для предотвращения снижения ёмкости в электролит добавляют растворимые соли $\text{Mn}(\text{II})$ [3]. Электрохимическое окисление $\text{Mn}_{(\text{p})}^{2+}$ до MnO_2 – один из процессов, приводящих к изменению фазового состояния и микроструктуры диоксида марганца на электроде. Целью данного исследования являлось установление роли катионов $\text{Mn}_{(\text{p})}^{2+}$ в окислительно-восстановительных процессах на электродах MnO_2 в составе цинк-ионных аккумуляторов.

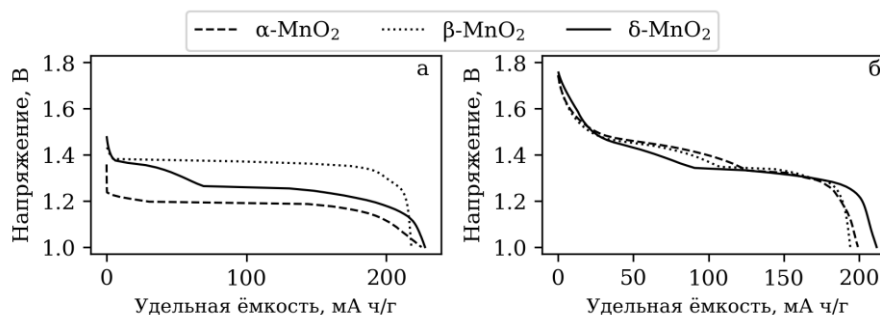


Рисунок 1 – Кривые разряда аккумулятора Zn-MnO_2 с электролитом ZnSO_4 (1 моль/л) и различными полиморфными модификациями MnO_2 на положительном электроде в первом (а) и пятидесятом (б) циклах

Процессы, протекающие на электродах, содержащих MnO_2 в различных полиморфных модификациях, исследовали методом циклической вольтамперометрии. Рабочий электрод представлял собой композицию на основе порошка MnO_2 с высокодисперсным углеродом (проводящая добавка) и поливинилиденфторидом (связующее) в соотношении 8:1:1 по массе. Электрод сравнения и вспомогательный электрод представляли собой цинковые пластины. Электролитом выступал раствор ZnSO_4 (1 моль/л) и раствор, содержащий ZnSO_4 (1 моль/л) и MnSO_4 (0,1 моль/л).

На рисунке 2а приведены кривые гальваностатического разряда ячейки током 100 мкА до 1 В. Циклическая вольтамперограмма ячейки с электролитом без добавки MnSO_4 приведена на рисунке 2б. На катодных сканах присутствуют два пика при 1,25 В и 1,4 В, на анодных – при 1,55 В и 1,65 В. Максимальный ток в пиках при 1,25 В и 1,55 В снижается, а катодный ток при 1,4 В увеличивается с увеличением номера цикла. Таким образом, на протяжении этих циклов исходный MnO_2 , демонстрирующий катодный пик при 1,25 В, преобразуется в соединение, для которого характерен пик при 1,4 В. Снижение интенсивности катодного пика при 1,25 В и анодного пика при 1,5 В практически не происходит, если напряжение заряда ограничить

сверху до 1,6 В, как показано на рисунке 2в. Циклирование же электрода в интервале потенциалов 1,3–1,8 В (выше области катодного пика при 1,25 В) показывает, что рост пика при 1,4 В в этом случае не происходит (рис. 2г). Таким образом, анодный процесс при потенциале выше 1,6 В соответствует необратимому окислению соединения, содержащегося в системе после получения катодного пика при 1,25 В. Когда на электроде присутствует и исходная полиморфная модификация MnO_2 , и продукт окисления при 1,65 В, при разряде наблюдаются пики, соответствующие им всем.

В электролите с добавкой MnSO_4 при потенциале выше 1,8 В относительно электрода сравнения (рис. 2д) наблюдается интенсивный анодный ток. В этой области потенциалов единственным устойчивым продуктом окисления Mn^{2+} является диоксид марганца, поэтому ток соответствует процессу окисления Mn^{2+} до MnO_2 . На протяжении четырёх циклов катодные пики растут – это означает, что на электроде появляется всё больше MnO_2 . Если область потенциалов ограничить интервалом 1–1,8 В (рис. 2е), рост интенсивности пиков снижается, но присутствует.

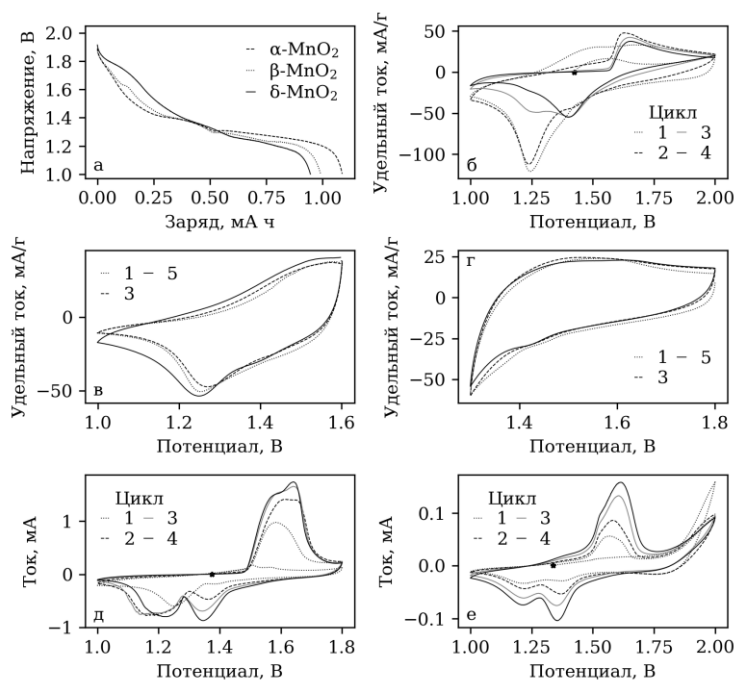


Рисунок 2 – Разрядные кривые электродов MnO_2 в растворе $\text{ZnSO}_4 + \text{MnSO}_4$ в третьем цикле (а), циклические вольтамперограммы $\delta\text{-MnO}_2$ в растворе ZnSO_4 (б, в, г) и в растворе $\text{ZnSO}_4 + \text{MnSO}_4$ (д, е).

Осаждение MnO_2 на $\delta\text{-MnO}_2$ -электрод при циклировании охарактеризовано методом сканирующей электронной микроскопии. На рис. 3а показан снимок электрода до электрохимических экспериментов. Диоксид марганца на исходном электроде представлен наноразмерными хлопьями, собранными в агрегаты. Снимок электрода после

осаждения на него MnO_2 (рис. 3б) значительно отличается: поверхность электрода покрыта более крупными и гладкими агрегатами диоксида марганца. После трёх циклов разряда-заряда током (рис. 3в) поверхность электрода также покрыта слоем осаждённого вещества. Таким образом, осаждающийся диоксид марганца блокирует доступ электролита к веществу под его слоем и отвечает за разряд-заряд аккумулятора в поздних циклах и форму разрядной кривой на рис. 1б.

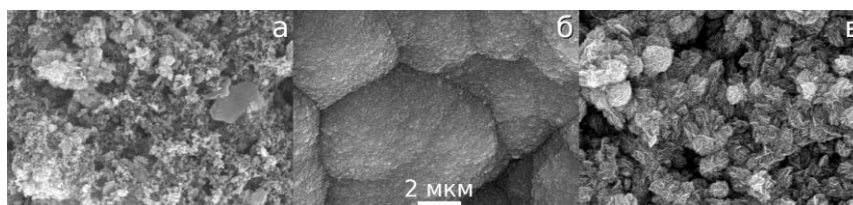


Рисунок 3 – СЭМ-изображения исходных электродов $\delta\text{-MnO}_2$ (а), электродов $\delta\text{-MnO}_2$ после осаждения MnO_2 (б), электродов $\delta\text{-MnO}_2$ после циклирования (в)

Закключение. Добавка соли Mn^{2+} к электролиту водного цинкового аккумулятора с положительным электродом из MnO_2 приводит к ускорению переосаждения MnO_2 , что обуславливает свойства аккумулятора в поздних циклах. Наиболее быстро этот процесс протекает при зарядке аккумулятора напряжением выше 1,8 В. Наличие нескольких стадий разряда-заряда на циклических вольтамперограммах и разрядных кривых связано с присутствием на электроде нескольких фаз диоксида марганца.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» на 2021–2025 гг. (научно-исследовательские работы 20210562 и 20211465).

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, X. Rechargeable Zn– MnO_2 batteries: advances, challenges and perspectives / X.Li [et al.] // *Nanotechnology*. – 2020. – Vol. 31. – No. 12. – P. 122001.
2. Siamionau, U. Rechargeable zinc-ion batteries with manganese dioxide cathode: How critical is choice of manganese dioxide polymorphs in aqueous solutions? / U. Siamionau [et al.] // *Journal of Power Sources*. – 2022. – Vol. 523. – P. 231023.
3. Pan, H. Reversible aqueous zinc/manganese oxide energy storage from conversion reactions / H.Pan [et al.] // *Nature Energy*. – 2016. – Vol. 1. – No. 5. – P. 1-7.
4. Stoševski, I. Formation of $\text{Mn}_x\text{Zn}_y(\text{OH})_z\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ —not intercalation of Zn—is the basis of the neutral MnO_2/Zn battery first discharge reaction / I. Stoševski [et al.] // *Electrochimica Acta*. – 2021. – Vol. 390. – P. 138852.

Подсекция «АВТОМАТИЧЕСКИЕ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

УДК 519.62

Е.В. Дубиковская, магистрант;
Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
И.Г. Сухорукова, ст. преп.;
Д.О. Арпентий, студент (БГТУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ РАЗОМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В самом простейшем случае существуют два подхода к системам управления: управление с обратной связью и управление с прямой связью или по-другому – замкнутые и разомкнутые. Первые системы широко используются в промышленности благодаря универсальности, точности и простоты реализации. Сама идея разомкнутого управления появилась относительно давно. Первое успешное применение 1925 года. Однако она не применялась широко в промышленных процессах до 1960-х годов. Это обусловлено началом применения микропроцессорной техники, и в первую очередь ПЛК.

В первую очередь необходимость в применении таких систем является наличие существенных динамических возмущений и инерционность объекта управления.

Есть варианты, когда разомкнутые системы применяются непосредственно, но более рационально их использование вместе с системами с обратной связью. Во многих примерах показана эффективность их применения исследовательских работах и книгах показаны значительные улучшения в производительности управления системой после применения управления с прямой связью [1-3].

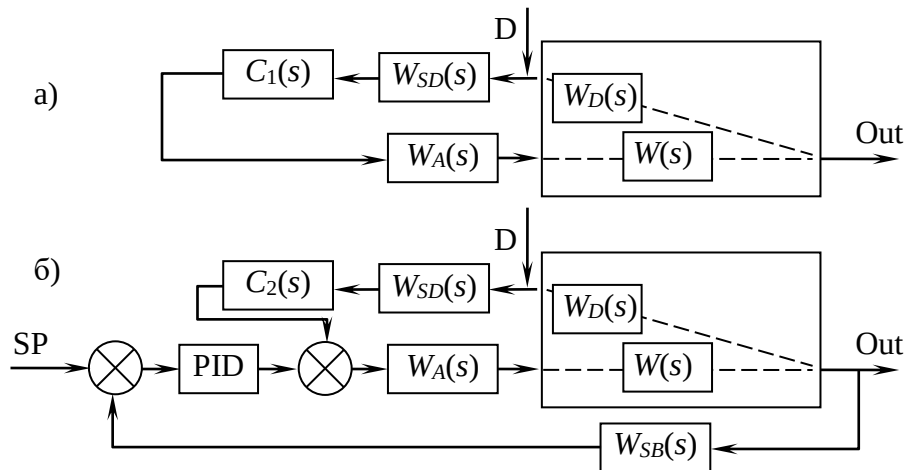
В зависимости от целей управления существуют два подхода для использования регуляторов разомкнутой системы (РРС): подавление помех и системы слежения. В последнем случае в качестве возмущения выступает постоянное изменение сигнала задания. Первый подход более всего характерен для химической технологии, так как многие объекты (реакторы, ректификационные технологии, сушилки и т.д.) подвержены существенным возмущениям. Без регулятора разомкнутой связи с подавлением помех в контуре управления система будет пытаться устранить ее влияние, когда она обнаружится на выходе. Чаще всего в химической технологии применяется сочетание систем замкнутого и разомкнутого управления (рис. 1, б)

Другой подход разомкнутого регулятора, нацеленный на улучшение характеристик отслеживания опорных сигналов, также широко

использовался в различных областях. Он помогает системам достигать идеальной характеристики слежения без изменения исходной разомкнутой структуры.

PPC также широко применяются в технологических процессах, когда необходимо поддерживать соотношение между двумя технологическими потоками.

В литературе можно встретить различные критерии для принятия решения построения разомкнутой системы. На самом деле, в отличие от систем с ПИД-регулятором, которые имеют небольшие ограничения по эффективному использованию, регуляторы системы разомкнутого управления имеют больше ограничений. Наиболее часто выделяю следующие аспекты: динамика контура возмущения имеет большую инерционность, чем основной канал обратной связи; динамика контура возмущения имеет постоянно изменяющиеся коэффициенты передаточной функции; при синтезе, получается передаточная функция регулятора, которая не поддается реализации на микропроцессорной технике; наличие шумов в канале контроля возмущения при применении разомкнутого регулятора может привести к существенному снижению надежности исполнительного механизма; экономические затраты на реализацию (затраты на покупку датчика, монтаж, настройка регулятора и т.д.) несопоставимы с получаемой выгодой.



$C(s)$ – передаточная функция PPC; $W_{SD}(s)$ – датчик контроля возмущения;
 D – сигнал возмущения; $W_D(s)$ – передаточная функция по каналу возмущения;
 $W(s)$ – передаточная функция основного канала; SP – сигнал задания;
 PID – передаточная функция регулятора обратной связи; $W_A(s)$ – передаточная функция исполнительного механизма; $W_{SB}(s)$ – передаточная функция датчика основного параметра; Out – основной выходной параметр

Рисунок 1 – Структурные схемы разомкнутого управления

Синтез идеального PPC для системы подавления возмущения не сложен, хотя существуют разные подходы. Основные проблемы возникают с цифровой реализуемостью. Обычно так получается вследствие

того, что запаздывание по каналу возмущения больше, чем по управлению или расчетный порядок полинома числителя передаточной функции больше чем знаменателя.

Эффективный РРС слежения всегда проектируется на основе обратной модели передаточной функции замкнутой системы с обеспечением минимизации фазового отклонения. Синтез таких регуляторов рекомендуется производить в дискретной области. Другим вариантом синтеза является использование линейного квадратичного оптимального управления. В отличие синтеза по фазовой ошибке, здесь производится минимизация квадратичного отклонения. Обычно такой подход используют для систем управления движением. Последний вариант имеет более плавную траекторию выходного параметра.

Кроме классических подходов теории управления развиваются системы использования РРС с применением нечетких, нейронных и гибридных систем [3-4]. Классические алгоритмы имеют некоторые ограничения. Например, трудно иметь дело с нелинейностями системы, неопределенностями модели установки и задержкой по времени. Поэтому, за исключением традиционных алгоритмов управления с прямой связью, существуют некоторые усовершенствованные схемы управления, которые сочетают концепцию прямой связи с некоторыми методами интеллектуального управления. Однако в большинстве источников трудно найти практическое подтверждение интеллектуальных алгоритмов с РРС. Обычно они ограничиваются имитационным моделированием. Следовательно, проблема реализации и экономические преимущества этих новых схем управления все еще должны быть апробированы на реальных объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление в химической промышленности. Под ред. Е.Г. Дудникова – М.: Химия, 1987. – 368 с.
2. Эффективное подавление помех в системах регулирования / Д. А. Гринюк [и др.] // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 г. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 270-274
3. Industrial feedforward control technology: a review / Lu Liu [et al] // Journal of Intelligent Manufacturing, Springer, 2019vol. 30(8), pages 2819-2833,.
4. Chen, S. S. (1992). Intelligent control of semiconductor manufacturing processes. In Proceedings of IEEE international conference on fuzzy systems. IEEE, pp. 101–108.

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
Н.М. Олиферович, ст. преп.;
Н.И. Подтероб, студ.;
Д.О. Новицкая, студ.
(БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ MODEL PREDICTIVE CONTROL

Построение систем Model Predictive Control это развитие принципа управления по модели, который был предложен в прошлом веке. В MPC для управления применяется частичная оптимизация, которая состоит из модели объекта в z-состоянии и целевой функции, которая может быть адаптирована к целям управления пользователя. Начиная с начального состояния, поведение выходной переменной системы прогнозируется на каком-то ограниченном горизонте прогнозирования. MPC позволяет предвидеть реакцию системы на возмущения и, одновременно, формировать управление с учетом ограничений системы. В отличие от классического подхода, оптимизация управляющего воздействия производится на ограниченном интервале, горизонте.

Отличие управления на основе MPC и ПИД-регулятора в следующем:

- математическую модель контролируемой системы в MPC, стратегия управления фокусируется на том, как будут вести себя выходные переменные на текущем состоянии системы и заданного горизонта планирования. В ПИД регуляторе управление формируется на основе текущей ошибки и прошлых значений с интегральной и дифференциальной составляющей регулятора.
- MPC стратегия строится на минимизации влияние возмущения путем упреждающего управления. Тогда как классический ПИД-регулятор будет реагировать на возмущение только когда оно проявится в обратной связи.
- При расчете управляющего значения технология MPC учитывает ограничения, что совсем не свойственно ПИД-регулятору за исключением перенастройки поведения, когда управляющее воздействие достигает ограничений.
- При синтезе MPC формируется многопараметрическое управление объекта управления, что не требует итерационного расчета, которое характерно для много параметрического ПИД управления.
- MPC на этапе проектирования может произвести учет нелинейностей в системе.

Одним из недостатков использования MPC регулирования является сложность в реализации и расчетах, что существенно ограничивает его применение на практике.

Существует широкий класс методов проектирования MPC управления. Условно их делят на прямые и косвенные [1]. При прямом синтезе задачи управления и модуляции формулируются и решаются на одном этапе, поэтому не требуется модулятор.

Методы прямого проектирования MPC можно разделить на: Прямое управление с прогнозированием модели с отслеживанием эталона (Direct model predictive control with reference tracking); прямое управление прогнозированием модели с гистерезисными границами (Direct model predictive control with hysteresis bounds); прямое управление прогнозированием модели с неявным модулятором (Direct model predictive control with an implicit modulator).

В косвенном MPC контроллер вычисляет модулирующий сигнал, вектор с реальным значением, который затем подается в модулятор для генерации команд переключения. Косвенные методы MPC подразделяют по виду сигнала модулятора: синусоидальная модуляция ШИМ (SPWM) и модуляцию пространственного вектора (SVPWM).

Перед синтезом MPC обычно получают модель объекта управления в пространстве состояния с непрерывным временем. Затем производят преобразование ее в дискретную область.

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \Rightarrow x(n+1) = Ax(n) + Bu(n),$$

$$y(t) = Cx(t), \Rightarrow y(n) = Cx(n),$$

где x – переменные, которые отражают внутреннее состояние объекта; u – управляющее воздействие; y – выходные переменные; A, B, C – коэффициенты динамики в матричной форме.



Рисунок 1 – Переменные объекта управления

Следует отметить, что существует много способов перехода между непрерывной и дискретной областями. Важным аспектом является выбор времени дискретизации (sample time), что может существенно повлиять на стабильность работы. Приходится искать компромисс между быстроедействием и вычислительной нагрузкой.

Следующим этапом проектирования является выбор горизонтов прогнозирования и управления. Здесь также приходится искать баланс

между производительностью и эффективностью, чтобы обеспечить предсказание поведения и точность управления. Горизонт прогнозирования выбирается исходя величины основной постоянной времени объекта управления. Слишком длинный горизонт прогнозирования, несмотря на преимущества, имеет проблемы с вычислительной сложностью, памяти, временем отклика и чувствительность к неточностям модели. Длина горизонта управления находится в диапазоне горизонта прогнозирования и подчиняется компромиссному решению между степенью свободы и вычислительной нагрузке.

Расчеты будущего поведения производятся в каждый момент выборки в пределах горизонта прогнозирования. Поведение выходной переменной определяется в рамках горизонта управления на основании алгоритма оптимизации и выбирается та, которая удовлетворяет системным ограничениям, минимизируя целевую функцию. Этот итеративный процесс происходит в каждый момент выборки с учетом новой измеренной информации, пересчитывая управляющие последовательности благодаря обратной связи, введенной удаляющимся горизонтом.

Выбор целевой функции оптимизации для алгоритма управления также достаточно сложный процесс. Он также оказывает влияние на вычислительные требования к контроллеру.

При поиске рациональной целевой функции приходится обращать внимание на вид нормы – математического параметра, который производит численную оценку ошибки между прогнозируемыми и контрольными значениями, т.е. насколько близко поведение системы желаемой. В целевую функцию вводят систему штрафов для управляющего воздействия для балансировки компромисса между достижением цели управления и минимизацией управляющих действий, необходимых для ее достижения. Одним из сложных решений приходится принимать при выборе весовых коэффициентов целевой функции, которая упирается в проблему многокритериальной оптимизации. Практически всегда, целевая функция содержит жесткие и мягкие ограничения, которые накладывают физическими параметрами системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Karamanakos, E. Liegmann, T. Geyer and R. Kennel, “Model Predictive Control of Power Electronic Systems: Methods, Results, and Challenges,” in IEEE Open Journal of Industry Applications, Aug. 2020.

2. Blardone D.. Introduction to Model Predictive Control. URL: <https://imperix.com/doc/implementation/model-predictive-control>. (accessed: 13.12.2024).

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Герметичность очень широкое понятие. В инженерной среде его используют в приборах и методах неразрушимого контроля. Интенсивное развитие промышленности, сенсорики, новых вычислительных методов, автоматизации измерений и диагностики способствуют широкому кругу исследований в этом направлении.

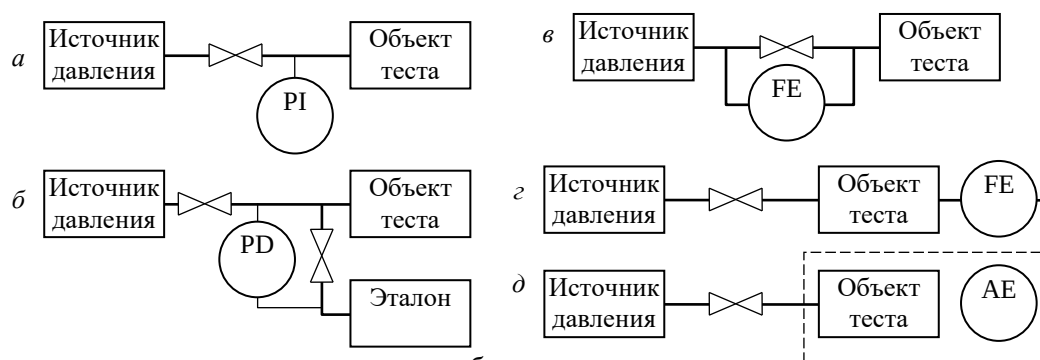
В промышленных условиях испытаний на герметичность интенсивно внедряются методы автоматического контроля. Особенно это касается испытаний запорной арматуры в условиях производства и ремонта. Установки, как правило, оснащены измерительными преобразователями с аналоговыми или цифровыми выходами, которые подключены к аппаратуре управления, регистрации, анализа и формирования протокола испытания. Чаще всего встречаются установки, структуры которых представлены на рис. 1.

Для испытаний используется подготовленный воздух. Достоинством таких подходов является:

- надежность, которая подтверждена многолетними испытаниями;
- достоверность и точность, которая обеспечивается серийными проборами;
- скорость проведения испытаний за счет автоматизации и внедрение вычислительной техники;
- низкая стоимость за счет использования типовой трубопроводной арматуры и приборов.

Решение на рис. 2, *а* для измерения герметичности использует изменение изменения давления в линиях высокого давления после достижения давления испытания и перекрытии входного клапана. Пересчет утечки осуществляется за счет уравнений газовых законов. Сильное влияние температуры и низкая точность.

Датчик дифференциального давления в схеме на рис. 2, *б* обеспечивает лучшую точность. Стоимость установки выше. Температура и идентичность эталонного устройства влияет на точность. Как и в первом случае необходимо пересчитывать перед давления в размер утечки.



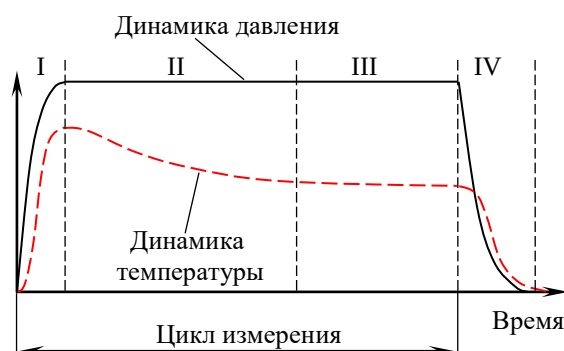
a – по изменению давления; *б* – по изменению перепада давления;
в – путем измерения массового расхода на входе; *г* – путем измерения массового расхода на входе; *д* – по изменению концентрации

Рисунок 1 – Структурные схемы испытания трубопроводной арматуры

Применение массового расходомера (рис.2, *в*) существенно повышает капитальные затраты, но точность может быть увеличена на порядок. Обеспечивается гибкость по диапазону давлений испытания и короткое время проведения тестов.

Подход на рис.2, *г* используется в основном для испытания запорной арматуры и обеспечивает хорошую чувствительность. Временные затраты и автоматизируемость хуже, чем у предыдущих вариантов. Последний метод требует источника гелия. Хорошая чувствительность, универсальность.

Для всех методов существуют отработанные алгоритмы испытаний, с помощью которых пытаются учесть различные физические аспекты влияющие на точность показаний. Практически для всех схем, в той или иной мере, характерно влияние на результат измерения переходных процессов температуры и давления (рис. 2), которые пытаются учесть тем или иным способом.



I – время установки давления; II – установка температурных процессов;
 III – период измерения; IV – сброс давления

Рисунок 3 – Вариант переходных процессов при испытаниях

При выборе схемы испытания следует обращать внимание на диапазоны допустимых скоростей утечек и давления испытаний давлением важными, что существенно влияет на стоимость установки. Нет смысла определять размера значительно ниже допустимых значений. В условиях массовых испытаний также важным аспектом является время теста и эргономика рабочего места оператора.

Следует отметить, что стоит обращать внимание, что запорная арматура выпускается на различное рабочее давление. В тоже время размер утечки не всегда пропорционален рабочему давлению, очень часто наблюдаются нелинейные эффекты. При тестах лучше всего моделировать условия применения. Следует обращать внимание и на температуру эксплуатации. Имеет значение также влажность.

Испытание на герметичность в автоматическом режиме можно разделить примерно на четыре фазы: I – заполнение; II – балансировка, III – измерение, IV – сброс (рис. 2).

Отсекание первых двух этапов являются очень важным. Гидродинамические процессы, возникающие при заполнении, должна успокоиться.

Тепловые процессы более длительны, и их тяжелее всего стабилизировать. Температура воздуха редко совпадает с температурой детали и окружающей среду. Также происходит преобразование движения воздуха в изменение температуры. И если температура вследствие сжатия, расширения и трения обычно стабилизируется быстро, то нестабильность температуры из-за обмена энергией между деталью и воздухом может быть достаточно длительной.

С использованием уравнения Менделеева – Клапейрона можно нивелировать влияние дрейфов температуры. Применение современных методов численного анализа с использованием нейронных сетей, машинного обучения можно еще больше улучшить динамику и точность проверки арматуры на герметичность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Повышение чувствительности измерителя про-течек запорной арматуры // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 132–136.
2. Гринюк Д. А., Сухорукова И. Г., Олиферович Н. М. Развитие систем контроля герметичности // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290) (в печати).
3. Leak Test Handbook Measuring, Testing, Practical Use. URL: https://www.jwff.com/fileadmin/userupload/downloadfiles/200423-jwff-leacktestfibel_EN_LOWRES.pdf (accessed: 13.12.2024).

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
В.И. Бакаленко, доц., канд. техн. наук;
М.Д. Былина, студ.; И.А. Захвей, студ. (БГТУ, г. Минск)

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЧВЫ

Для анализа природных сред и растворов используется широкий класс приборов [1], которые в настоящее время используются в сельскохозяйственных исследованиях, включают электрическое сопротивление (ER), временную рефлектометрию (TDR), георадар (GPR), емкостные зонды (CP), радиолокационную рефлектометрию или активные микроволны (AM), пассивные микроволны (PM), электромагнитную индукцию (EMI), нейтронную термализацию, ядерный магнитный резонанс (ЯМР), затухание гамма-излучения и приповерхностное сейсмическое отражение. Наиболее часто, из-за доступности, простоты реализации используют кажущуюся электропроводность почвы (E_{Ca}), т. е. удельная проводимость. Для ее измерения используют два подхода: контактный и без контактный. Обычные рабочие диапазоны частот безконтактных приборов для этих электромагнитных методов: ЭМИ (от 0,4 до 40 кГц), КП (от 38 до 150 МГц), ГПР (от 1 до 2000 МГц), TDR (от 50 до 5000 МГц), AM (от 0,2 до 300 ГГц) и ФМ (от 0,3 до 30 ГГц) [2].

Интенсивное развитие сельского хозяйства потребовало разработку быстрых, надежных и простых измерений методов измерения E_{Ca} . Однако очевидно, что на E_{Ca} влияет не только засоленность, но и множество других свойств почвы, которые влияют на электропроводность в объеме почвы, включая содержание воды θ , содержание глины и минералогию, органическое вещество, объемную плотность (ρ_b) и температуру. Результат взаимосвязи и взаимодействия этих свойств почвы определяет значение E_{Ca} . Решающим фактором развития контактного метода измерения E_{Ca} простым в проведении на больших площадях. Особенно когда для этого стали применяться автоматизированные методы привязки измерений к геолокации. Платформы, смонтированные на тракторах и вездеходах, сделали интенсивные измерения в масштабе поля обычным явлением. Особенно часто электропроводность используют для оценки солености почв.

В самом простейшем случае, для определения E_C почвенный раствор помещают между двумя электродами и на определенном расстоянии. Электропроводность является обратной величиной сопротивления:

$$E_{C_T} = k / R_T,$$

где E_{C_T} – электропроводность раствора в См м^{-1} при температуре

T ($^{\circ}\text{C}$), k – постоянная ячейки, а R_T – измеренное сопротивление при температуре T . Электролитическая проводимость увеличивается со скоростью приблизительно 1,9 процента на каждый градус Цельсия. Обычно EC рассчитывают для температуры 25°C . Для пересчета используют формулы

$$EC_{25} = f_T EC_T,$$

где $f_T \approx 0,447 + 1,4034 \exp(-T/26,815)$ – коэффициент преобразования температуры.

Лучшим решением для измерения засоленности использовать вытяжки, но из сложности и временных затрат чаще всего используют непосредственное измерение проводимости ECa , хотя это и сопряжено со сложностью интерпретации результатов измерения. Используются и другие подходы для измерения ECa , как например ER и EMI, которые легко сделать переносными и использовать в полевых условиях. Наиболее часто для измерения электрического сопротивления используют схему на четырех электродах для уменьшения влияния электродных эффектов. Но бывают варианты и с 8 электродами (рис.1). Для простоты расчетов стараются располагать на фиксированных расстояниях, но существуют и варианты пересчета и для более сложной геометрии.

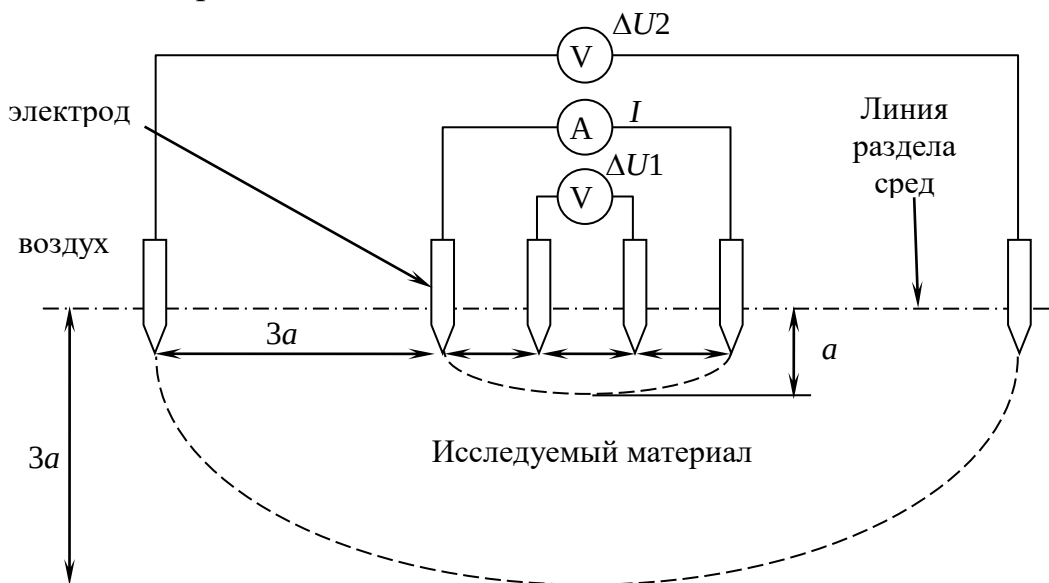


Рисунок 1 – Электродная схема измерения проводимости

Ток измеряется с помощью пары внутренних электродов, а напряжение внешней.

$$ECa = \frac{I + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}{4\pi a \Delta U} I.$$

На рисунке штриховой линией показан примерный объем почвы, который влияет на измерения, так называемый массива Венера [4]. 8 электродная схема позволяет оценить неоднородность проводимости, разделить на слои.

Современные измерительные схемы для датчика строятся на разных технических решениях предварительных усилителей с применением микроконтроллеров. Существует готовое интегральное решение для построения измерителя на базе AD5941 от Analog Devices Inc.

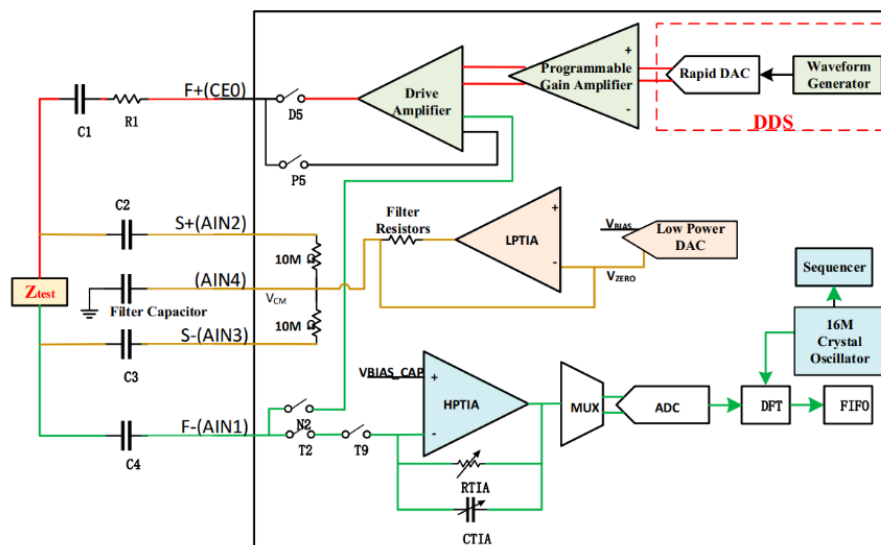


Рисунок 2 – Структура AD594 и схема подключения

Следует отметить, что для учета сложностей интерпретации измерений для измерительных систем проводимости начали привлекать нейронные сети [5].

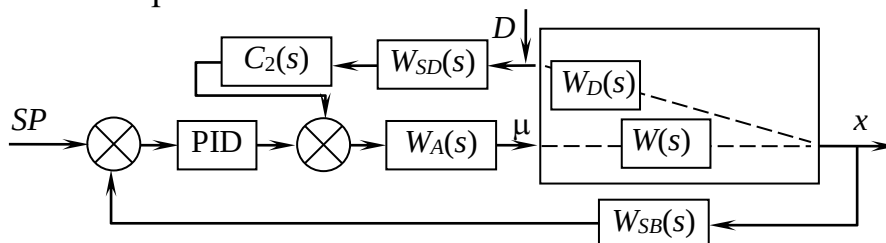
ЛИТЕРАТУРА

1. Измерение влажности почвы / Д. А. Гринюк [и др.] // Химическая технология и техника: материалы 88-й науч.-техн. конф, Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 297-299.
2. Handbook of Agricultural Geophysics. / B. J. Allred [at al]. Penrbit: Taylor & Francis Group. Tahun, 2008. 410 p.
3. Development of a soil electrical conductivity measurement system in paddy fields/ The-Anh Ho [at al] // International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS), Vol. 13, No. 2, June 2024, pp. 389~400.
4. Wenner, F., A method of measuring earth resistivity, in scientific papers of the U.S. Bureau of Standards, No. 258, pp. 469–78, 1915.
5. Mustafa, R., Ansari, A. Comprehensive analysis of soil electrical conductivity: an experimental and machine learning approach. // Discov Civ Eng 1, 82 (2024).

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
 Н.М. Олиферович, ст. препод.;
 М.Л. Бажко, студ.; М.С. Старовойтов, студ.
 (БГТУ, г. Минск)

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗНЫХ ВАРИАНТОВ КОМПЕНСАТОРОВ

Комбинированные системы широко используются для улучшения качества управления в рамках современной концепции усовершенствованного управления. Для настройки данной системы предлагают разные подходы. Наиболее часто встречается предложение об использовании принципа инвариантности [1]. В работах высказывалось предположение об упрощенном способе настройки с помощью интегральных критериев [2, 3]. Для сравнения этих подходов решено произвести их сравнение.



$C(s)$ – передаточная функция компенсатора; $W_{SD}(s)$ – сенсор возмущения;
 D – сигнал возмущения; $W_D(s)$ – канал возмущения; $W(s)$ – основной канал;
 SP – задание; PID – регулятор; $W_A(s)$ – исполнительный механизм;
 $W_{SB}(s)$ – сенсор основного параметра; x – выход

**Рисунок 1 – Структурные схемы комбинированной
(инвариантной системы) управления**

В качестве передаточных функции выбраны такой вариант, который допускает реализацию инвариантного компенсатора:

$$W_{SD}(s) = \frac{1}{25s + 1}; \quad W_{SB}(s) = \frac{1}{40s + 1}; \quad W_A(s) = \frac{1}{5s + 1};$$

$$W_D(s) = \frac{0,87 \exp(-3s)}{(9,3s^2 + 7s + 1)(25s^2 + 11s + 1)(133s + 1)};$$

$$W(s) = \frac{0,87^2 \exp(-3s)}{(3000s^2 + 80s + 1)(133s + 1)}.$$

Настройку ПИД регулятора произвели по критерию [4]:

$$I_1 = \int_0^{tp} t^2 |e| dt, \quad (1)$$

где e – сигнал ошибки, $SP - x$; tp – время моделирования; t – время.

Расчет параметров теоретического (полного) компенсатора производили по формуле

$$C(s) = \frac{W_D(s)}{W(s) W_A(s) W_{SD}(s)}. \quad (2)$$

Настройку упрощенной формулы компенсатора производили путем минимизации двух интегральных критериев:

$$I_2 = \int_0^{tp} t^2 |x| dt; \quad (3)$$

$$I_3 = \int_0^{tp} x^2 dt. \quad (4)$$

В качестве компенсатора использовали форсирующее звено [3]:

$$C_{FP} = k \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}. \quad (5)$$

Результат настройки можно видеть на рис. 2.

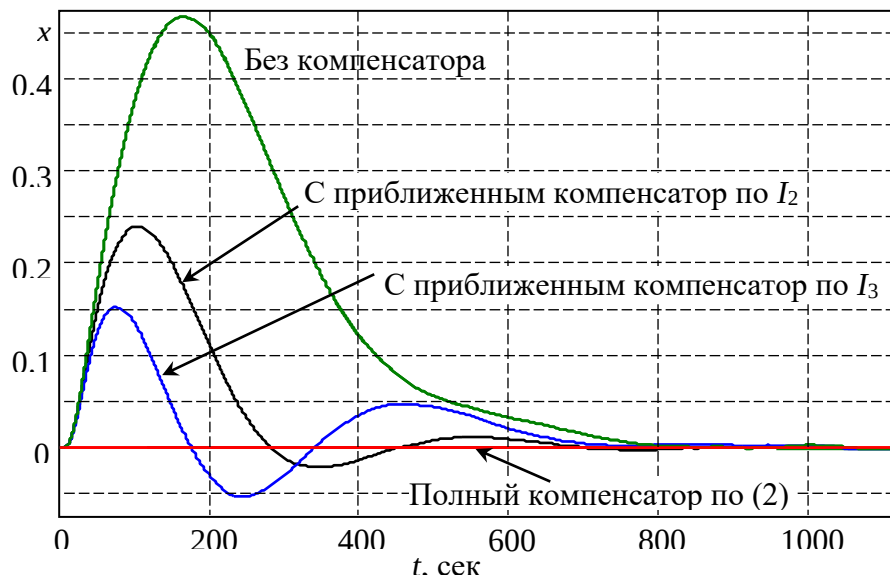


Рисунок 2 – Сравнение работы компенсаторов

Как видно из рис. 2, теоретический компенсатор идеально подавляет возмущение. Отклонение не больше 10^{-3} . С помощью компенсатора (5) удалось уменьшить отклонение в 2–2,5 раза. Из этого результата следует еще вывод, что при настройке приближенной формы компенсаторов для уменьшения амплитуды отклонения лучше использовать критерий (4).

Идеальная работа теоретического компенсатора возможна только при цифровом моделировании, так как практически не существует реальных объектов с линейными передаточными функциями, которые имеют неизменяющиеся во времени параметры. Как было показано в

[1-3] идеальный компенсатор очень редко реализуем. Еще существует одна проблема – это практическая реализация. На рис. 3 представлено перемещение регулирующего органа при условии наличия шумов канале измерения возмущения.

Хорошее подавление достигается для полного компенсатора за счет управляющего воздействия, в примерно в 25 больше номинального. А уровень шумов меньше для настроек компенсатора по (3), а максимальный для полного компенсатора.

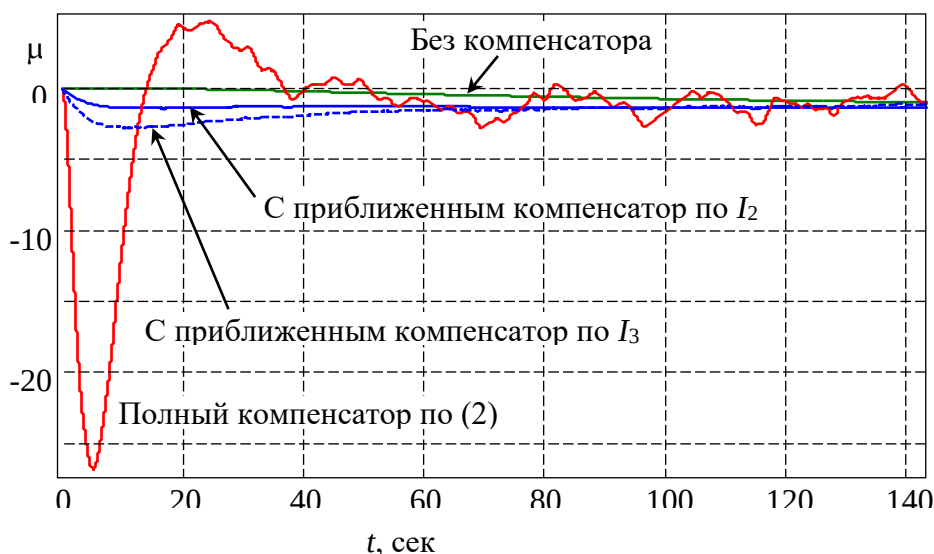


Рисунок 3 – Управляющее воздействие при разных вариантах управляющего воздействия

Выбор варианта компенсатора зависит от многих аспектов: возможностей управляющего воздействия; амплитуды шумов, требований по надежности и других прикладных ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление в химической промышленности. Под ред. Е.Г. Дудникова – М.: Химия, 1987. – 368 с.
2. Настройка инвариантных систем для промышленных решений / Д. А. Гринюк [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 85-ой науч.-техн. конф. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 243-245.
3. Эффективное подавление помех в системах регулирования / Д. А. Гринюк [и др.] // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Меж. науч.-тех. форума – Минск : БГТУ, 2021. – С. 270-274.
4. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 118–121.

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
И.Г. Сухорукова, ст. преп.;
Я.П. Станкевич, студ.;
Д.Ю. Ежиков, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ВИРТУАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

За последние сто лет релейная логика сыграла ключевую роль в развитии промышленной автоматизации. В современном мире на смену традиционным технологиям приходят новые решения, такие как IoT и системы с открытым исходным кодом, которые ставят под сомнение доминирующее положение классических ПЛК.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) существуют уже давно и стали ключевым инструментом управления на полевом уровне. Их длительное использование и постепенное усовершенствование способствовали формированию современной концепции управления – распределенных систем управления (РСУ). Несмотря на возможность применения одного мощного ПЛК с множеством модулей I/O, управление обычно распределяли между несколькими контроллерами, обеспечивая горизонтальный обмен информацией.

Исторически ПЛК разрабатывались на основе релейной логики и специализированных языков программирования, таких как IEC 61131-3. Они строились на принципах жёстко подключенных устройств, что способствовало стандартизации конфигурации и развитию специализированных протоколов. Однако развитие твёрдотельных технологий и микроконтроллеров изменило этот подход.

Современные ПЛК уже не зависят от жёстко заданных схем, а используют программное обеспечение, позволяя проектировщикам применять языки высокого уровня, такие как C и Python. При этом программирование остаётся тесно связанным с традиционной релейной логикой, но постепенно смещается в сторону использования более абстрактных методов.

На рынке уже представлены решения, в которых ПЛК работают под управлением Linux, что позволяет применять широкий спектр программных инструментов. Это открывает возможности для использования открытого исходного кода в промышленной автоматизации, но требует стандартизации языков программирования и разработки специализированных платформ.

Использование Raspberry Pi в качестве контроллера – одно из таких решений. Компании разрабатывают устойчивые к внешним условиям варианты этого устройства, дополняя его модулями ввода-

вывода для интеграции в промышленную среду. Однако программное обеспечение для таких решений пока недостаточно адаптировано к стандартам промышленной автоматизации.

Интернет вещей (IoT) стремительно меняет подход к сбору и обработке данных. Данные можно получать практически из любого источника, а их анализ даёт ценные инсайты для оптимизации производственных процессов. Однако традиционные ПЛК не приспособлены для работы с большими массивами данных, так как они ориентированы на управление в реальном времени, а обработка информации часто передаётся на более высокий уровень.

Для решения этой проблемы может использоваться переход к мощным одноплатным компьютерам, таким как Raspberry Pi, которые обеспечивают большую вычислительную мощность по сравнению с традиционными ПЛК. Однако такой подход требует значительных изменений в архитектуре автоматизированных систем.

Один из ключевых стандартов, способствующих развитию новых решений – Single Pair Ethernet (SPE), который объединяет различные версии промышленного Ethernet. SPE разработан для снижения энергопотребления, уменьшения размеров устройств и повышения их совместимости с интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами.

Однако в 2024 году произошёл значительный сдвиг в подходах к автоматизации. Разработчики представили концепцию виртуальных ПЛК (vPLC), которые благодаря развитию периферийных вычислений стали реальным и доступным решением для промышленного производства.

Виртуальные ПЛК представляют собой программные версии традиционных контроллеров, работающие в среде виртуальных машин (ВМ) вместо физического оборудования. В отличие от симуляторов ПЛК, используемых в обучении, vPLC предназначены для реального промышленного применения и функционируют в виртуализированной среде с операционной системой, адаптированной для работы в реальном времени.

На 2024 год уже доступны коммерческие решения, такие как CODESYS Virtual Control SL и Siemens SIMATIC S7-1500V. Внедрение vPLC способствует отходу от традиционной модели автоматизации, повышая гибкость и масштабируемость управления.

Преимущества и ограничения виртуальных ПЛК

Основные плюсы vPLC:

1. Гибкость и масштабируемость – отсутствие привязки к конкретному оборудованию.

2. Снижение затрат – уменьшение расходов на закупку и обслуживание физического оборудования.
3. Централизованное управление – упрощение обновления программного обеспечения и мониторинга.
4. Расширенные возможности безопасности – быстрая и централизованная защита от киберугроз.
5. Эффективное использование ресурсов – поддержка ИИ и машинного обучения для анализа данных.

Основные вызовы при внедрении vPLC:

- Сложность развертывания – требует знаний в области виртуализации и ИТ-инфраструктуры.
- Задержки в обработке данных – может негативно повлиять на работу систем реального времени.
- Риски централизованного управления – возможные сбои в сетевой инфраструктуре могут повлиять на весь процесс автоматизации.
- Требования к сертификации – обновления программного обеспечения vPLC могут потребовать повторной сертификации согласно стандартам безопасности.

Хотя виртуальные ПЛК открывают новые перспективы, их применение требует продуманного подхода. Виртуализация автоматизации неизбежно найдет свое место в отдельных отраслях, однако полное вытеснение традиционных ПЛК в ближайшем будущем маловероятно. Наиболее перспективным решением может стать комбинированный подход, сочетающий традиционные и виртуальные контроллеры для обеспечения надежности и эффективности систем управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Virtual PLC. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500/virtual-plc.html>.
2. Codesys virtual PLC. <https://www.codesys.us/products/codesys-virtual-plc.html>.
3. Virtual PLCs: What are the Advantages. <https://www.esa-automation.com/en/virtual-plcs-what-are-the-advantages/>.
4. Benefits and Challenges of Virtual PLCs. <https://www.rs-online.com/designspark/benefits-and-challenges-of-virtual-plcs>.
5. Taking a Look at the Virtual PLC Technology Stack. <https://blog.isa.org/taking-a-look-at-the-virtual-plc-technology-stack>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ BIG DATA И SMART DATA В АВТОМАТИЗАЦИИ

В современном мире объемы данных растут с невероятной скоростью, и управление ими становится одной из ключевых задач для успешного ведения бизнеса. Big Data (большие данные) и Smart Data (умные данные) представляют собой мощный инструмент, который кардинально меняет подходы к автоматизации процессов в различных отраслях.

Благодаря передовым технологиям анализа данных и машинному обучению, компании могут не только оптимизировать рабочие процессы, но и предсказывать тенденции, повышать производительность и улучшать клиентский опыт. Использование Big Data в автоматизации способствует созданию умных систем, которые способны самостоятельно адаптироваться к изменениям и принимать решения на основе огромного массива информации.

Термин Big Data описывает огромные объемы данных, как структурированных, так и неструктурированных, собираемых каждый день предприятиями. Большие данные могут поступать из любого количества источников – от социальных сетей и поиска Google до данных, собранных датчиками с промышленного оборудования.

Большие данные отличаются от других наборов данных тем, что из-за их размера их сложно обрабатывать с использованием традиционных методов обработки данных. Большие данные определяются, используя следующие четыре измерения – 4V больших данных:

- **Объем:** объем (структурированных и неструктурированных) данных, сгенерированных и сохраненных;
- **Разнообразие:** различные типы доступных данных, такие как текст, изображения, видео и т. д.;
- **Достоверность:** достоверность и качество данных, включая точность, согласованность и полноту;
- **Скорость:** скорость, с которой компания генерирует и обрабатывает данные.

С другой стороны, Smart Data – это «данные, которые передают и предоставляют достоверную, четко определенную и значимую информацию». Таким образом, они представляют собой большие данные (Big Data), которые были отфильтрованы, обработаны и подготовлены

для производственного контекста, чтобы после анализа привести к более эффективному процессу принятия решений. Расширенные алгоритмы аналитики и машинного обучения позволяют извлекать интеллектуальные данные из структурированных и неструктурированных текстов, документов, вложений, электронных писем и т.д., чтобы убедиться в их осмысленности и возможности получения ценных сведений.

Если рассматривать Smart Data с точки зрения измерений, как и Big Data, то к уже существующим 4V добавляется ещё одно измерение – ценность (Value), так как они более надежны, актуальны, полны, консолидированы и очищены.

Основные различия между Big Data и Smart Data:

1. Умные данные более целенаправленны. Большие данные не всегда нацелены на удовлетворение конкретных потребностей компании. В противном случае, умные данные более точны, позволяя компаниям использовать собранную информацию полезным и функциональным способом.

2. Smart Data качественнее. Умные данные – это данные, которые уже были отфильтрованы и проверены, что делает их превосходными по качеству, поскольку они безошибочны и более точны.

3. Smart Data обеспечивает более высокий уровень настройки. В отличие от Big Data, Smart Data более контекстуализированы и откалиброваны под конкретные потребности.

4. Умные данные более полезны для машинного обучения, так как если машины получают отфильтрованную информацию, они могут выявлять закономерности и выполнять конкретные задачи самостоятельно более эффективно и результативно.

В автоматизации использование этих подходов встречает определенные вызовы, на которые компаниям и предприятиям стоит обращать внимание.

Во-первых, обработка и хранение больших объемов данных требует эффективного управления и инфраструктуры, так что компании должны инвестировать в облачные решения и системы управления данными для обеспечения надежности и безопасности информации.

Во-вторых, анализ больших данных связан с рисками конфиденциальности и защиты информации. Важно разработать нормативные акты и этические стандарты для обеспечения безопасности данных и соблюдения законодательства.

В-третьих, внедрение Big Data требует интеграции с существующими системами и процессами. Компании должны использовать

промежуточное программное обеспечение и адаптировать инфраструктуру для обеспечения совместимости и эффективности.

Также работа с технологиями Big Data требует специальных навыков и знаний. Компании должны инвестировать в обучение и развитие персонала для подготовки специалистов по анализу данных и автоматизации.

Таким образом, использование Big Data, а также переход от Big Data к Smart Data открывает новые горизонты для автоматизации. Если Big Data предоставляет огромные объемы информации, то Smart Data фокусируется на извлечении действительно ценных и значимых данных, которые непосредственно влияют на принятие решений и улучшение процессов.

Использование умных данных в автоматизации позволяет компаниям не только оптимизировать свои операции, но и сделать их более предсказуемыми и адаптивными к изменениям рынка. В результате, бизнесы могут повысить свою эффективность, минимизировать риски и ускорить внедрение инноваций.

Таким образом, сочетание Big Data и Smart Data становится важным шагом на пути к созданию умных автоматизированных систем, способных преобразовывать данные в ценные решения для устойчивого развития и роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://netconomy.net/blog/big-data-smart-data/>– «Big Data vs. Smart Data»;
2. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.esa-automation.com/en/difference-between-big-data-and-smart-data/>– «Difference Between Big Data and Smart Data».
3. Паскова А.А. ТЕХНОЛОГИИ BIG DATA В АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ // Научное обозрение. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 23-27;

В.И. Бакаленко, доц., канд. техн. наук;
Т.А. Дейнека, ст. преп.;
Г.В. Шпаковский, магистрант (БГТУ, г. Минск);
А.Л. Бровенко (г. Москва, Россия)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕМКОСТНЫХ СЕНСОРОВ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ДИАПАЗОНЕ 75–100%RH

Информация о значении относительной влажности воздуха необходима для управления технологическими процессами, основанными на увлажнении и сушке, а также производствами, где существенную роль играют климатические условия. Одним из таких процессов является клональное микроразмножение растений (КМР), финальная стадия которого – адаптация, заключается в постепенном (в течение 20 дней) снижении относительной влажности воздушной среды с 95-100 %RH до 60%RH. Адаптация проводится либо в помещениях (теплицах), которые по отношению к влажности воздуха являются объектами с распределенными параметрами, либо в специализированных климатических камерах, где влажность воздуха во всем объеме камеры может быть условно принята одинаковой.

В обоих случаях (при значительных объемах производства) управление процессом адаптации требует применения большого количества сенсоров. При этом они должны обладать необходимыми метрологическими характеристиками при невысокой стоимости. Наилучшим образом данным требованиям соответствуют емкостные сенсоры, имеющие следующие характеристики:

- Диапазон измерений влажности от 20 до 100% RH
- Диапазон измерений температуры от -40 до 125 °C
- Погрешность измерений влажности не более $\pm 3\%$ RH
- Постоянная времени от 2 до 20 с.

Такие сенсоры выпускаются многими известными производителями: BOSH, Honeywell, Texas Instruments, Sensirion и другими.

Как следует из технической документации, наилучшие метрологические характеристики сенсоры имеют если рабочая температура находится в диапазоне от 0 до 70 °C, а влажность от 20 до 60%RH. При длительной эксплуатации сенсоров вне указанных выше пределов возможны обратимое или необратимое (в зависимости от типа сенсора) изменение заводских настроек.

Например, максимальное время нахождения сенсоров Sensirion при влажности более 80% составляет 60 часов, после чего, для восста-

новления характеристики, производитель рекомендует поместить его в среду с влажностью менее 60% или прогреть.

Кроме того, влагочувствительные полимеры сенсоров также способны поглощать молекулы других летучих компонентов, что приводит к их загрязнению и изменению статической характеристики (уменьшению чувствительности).

Многие из представленных на рынке сенсоров имеют внутренние 14 или 16 разрядные АЦП, а связь с микроконтроллером осуществляется с помощью стандартных интерфейсов I²C или SPI. Большинство сенсоров имеют в своем составе датчики температуры.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик недорогих емкостных сенсоров относительной влажности.

В качестве объектов исследований были выбраны сенсоры SHT41 производства Sensirion [1], которые при невысокой стоимости (около 5\$) имеют достаточно высокие метрологические характеристики:

- диапазон измерений влажности от 0 до 100%
- погрешность $\pm 2\%RH$
- разрешающая способность 0,01% RH
- разрядность АЦП 16 бит

Так как сами сенсоры имеют очень малые размеры – 1,5x1,5x0,7 мм и для их монтажа необходимо специальное оборудование, для экспериментов были выбраны модули, содержащие помимо самого сенсора необходимые дополнительные электронные компоненты и элементы коммутации.

На одних модулях (сенсор 1 и сенсор 2) были установлены преобразователи уровней сигналов



а)



б)

Рисунок 1 – Внешний вид модулей на основе сенсора SHT41

а) напряжение питания 5V

б) напряжение питания 3,3V

образователи уровней сигналов 5,0/3.3V, а также DC/DC преобразователь 5/3.3V, что позволяет подключать его к контроллерам с 5V питанием (Рис 1а). Другая модификация (сенсор 3 и сенсор 4) не имела подобных элементов и предназначена для работы с 3.3V логикой (рис 1.б).

В качестве вычислительного устройства использовался микроконтроллер ESP32C3[2].

Экспериментальная установка включала набор емкостей, в которых эталонная влажность воздуха (33, 75, 85% RH) создавалась с

помощью насыщенных растворов солей [3], а влажность 100% RH – дистиллированной водой.

Результаты испытаний приведены на рис. 2.

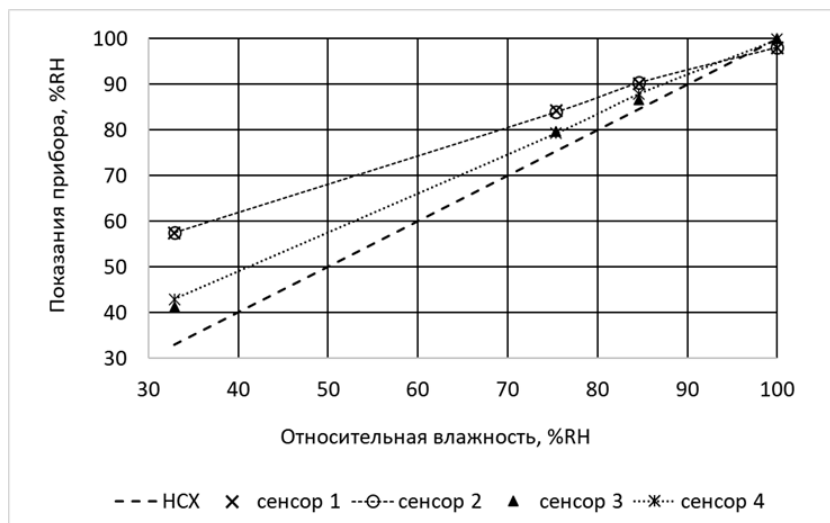


Рисунок 2 – Номинальная и реальные статические характеристики сенсоров

Как видно, реальная статическая характеристика существенно отличается от номинальной (НСХ), и погрешность значительно превышает заявленную. Нагрев сенсора до 100°C с помощью встроенного нагревателя не оказал никакого влияния.

На основании ознакомления с технической документацией Sensirion в части монтажа чувствительных элементов, можно предположить, что изготовитель модулей не выполнил все требования, что привело к значительному изменению статической характеристики сенсоров.

Для улучшения метрологических характеристики сенсоров была выполнена калибровка программным методом, которая состояла из 2 этапов. На первом этапе зависимость погрешности сенсора от измеряемой величины аппроксимировалась линейной функцией, а коэффициенты были рассчитаны так, чтобы прямая проходила через точки, соответствующие 33 и 85%RH. Максимальная погрешность в этом случае не превысила $\pm 2\%RH$.

На втором – зависимость погрешности от измеряемой величины была аппроксимирована полиномом второй степени, причем коэффициенты были рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов. При такой калибровке погрешность не превысила $\pm 1\%RH$ (рис.3).

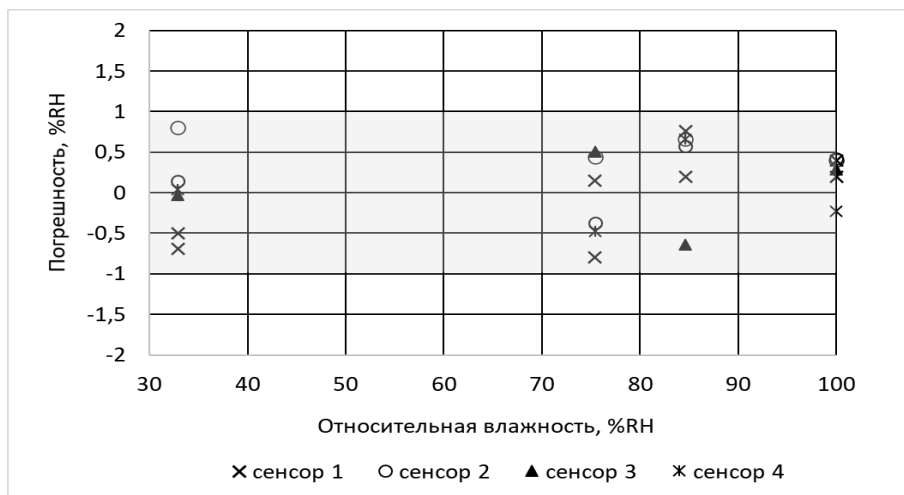


Рисунок 3 – Погрешность сенсоров после калибровки

Каждая точка, приведенная на рис. 3, представляет собой значение, усредненное по 10 измерениям. Выполнение математических операций при калибровке привело к некоторому увеличению случайной погрешности, при этом доверительный интервал каждого результата измерений не превысил $\pm 0,1\%$ RH.

Выполненные исследования показывают, что характеристики предлагаемых на рынке модулей на базе емкостных сенсоров влажности [1] могут значительно отличаться от заявленных, а их калибровка позволяет существенно компенсировать эти отклонения.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://sensirion.com/media/documents/C43ACD8C/6685097A/HT_DS_Datasheet_SHT4xA_1.pdf
2. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.
3. ГОСТ 28237-89 (МЭК 260-68) Камеры неинжекционного типа для получения постоянной относительной влажности.

АРХИТЕКТУРА ОСНОВНЫХ ТИПОВ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Управление динамическими объектами с помощью нечётких систем является новым перспективным направлением. С нечеткой логикой система может реагировать на входы более естественным и интуитивно понятным способом, позволяя обеспечить более надежный и адаптируемый контроль.

С точки зрения инженера по управлению, нечеткие системы управления могут обеспечить более интуитивно понятный способ управления сложными системами [1].

В отличие от традиционных систем управления, которые полагаются на точные математические модели, нечеткие системы управления могут быть разработаны на основе экспертных знаний и реального опыта. Это делает их более адаптируемыми к изменяющимся средам и условиям системы.

С точки зрения оператора системы, нечеткие системы управления могут обеспечить более естественный и интуитивно понятный способ взаимодействия со сложными системами.

Вместо того, чтобы полагаться на сложные математические модели и алгоритмы управления, нечеткая система управления может быть разработана, чтобы реагировать на входные данные более похожими на человека методами. Это может облегчить операторам понимание и управление сложными системами, даже без обширного технического опыта [2, 3].

Рассмотрим структурные схемы основных типов нечётких систем управления.

1. САУ с нечетким контроллером

При синтезе САУ с нечетким контроллером основная доля работы приходится на конструирование базы нечетких продукционных правил. Нечеткий контроллер реализует управление по состоянию, если продукции базы правил строятся с использованием лингвистических переменных, характеризующих состояние объекта. В этом случае цель управления в виде желаемого состояния объекта управления неявно вводится в базу правил экспертом на стадии формирования базы нечетких продукционных правил.

Архитектура САУ с нечетким контроллером, реализующей управление по состоянию, выглядит следующим образом (рис.1).

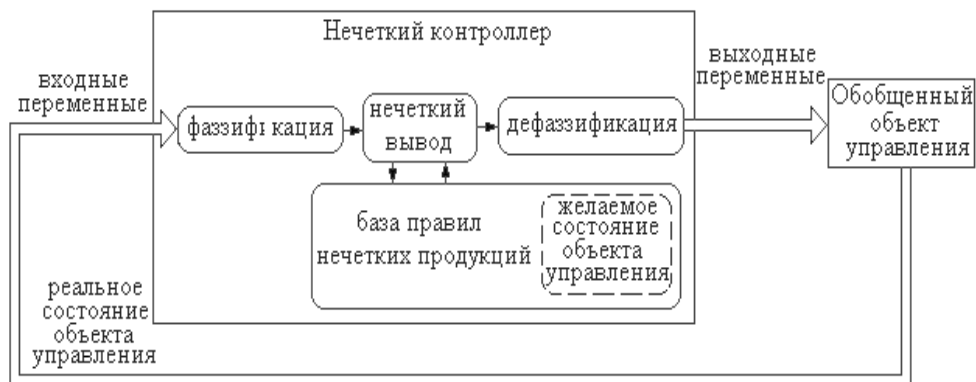


Рисунок 1 – САУ с нечетким контроллером и управлением по состоянию

Обобщенный объект управления включает в себя непосредственно управляемый технологический процесс, усилительно преобразующие механизмы, органы регулирования и датчики измерения переменных состояния объекта управления.

2. Гибридные нечеткие САУ

Гибридная нечеткая САУ – это иерархическая двухуровневая система автоматического управления, на нижнем исполнительном уровне которой находится традиционный регулятор, построенный в соответствии с методами классической теории автоматического управления, а на верхнем координационном уровне используется система нечеткого вывода для интеллектуальной коррекции параметров закона управления, реализованного на исполнительном уровне (рис. 2).



Рисунок 2 – Архитектура гибридной нечеткой САУ

В большинстве случаев при практической реализации гибридных контроллеров в качестве традиционного регулятора исполнительного уровня используется ПИД-регулятор, как обладающий одновременно удовлетворительными динамическими характеристиками при управлении различными классами объектов и возможностью легкой перенастройки параметров.

Адаптивные нечеткие САУ

Рассмотренные ранее САУ с нечетким контроллером и гибридные нечеткие САУ способны обеспечить стабильное управление сложным объектом только в случае, если структура и параметры управляемого объекта остаются достаточно стабильными.

Для сохранения заданного качества процесса управления объектом, структура и параметры которого претерпевают существенные изменения, необходимо производить адаптацию управления. САУ с нечетким контроллером не обладают подобными адаптационными возможностями.

Адаптивная нечеткая САУ представляет собой двухуровневую систему с нечетким контроллером на ведомом исполнительном уровне и нечетким блоком адаптации на ведущем координационном уровне (рис. 3).

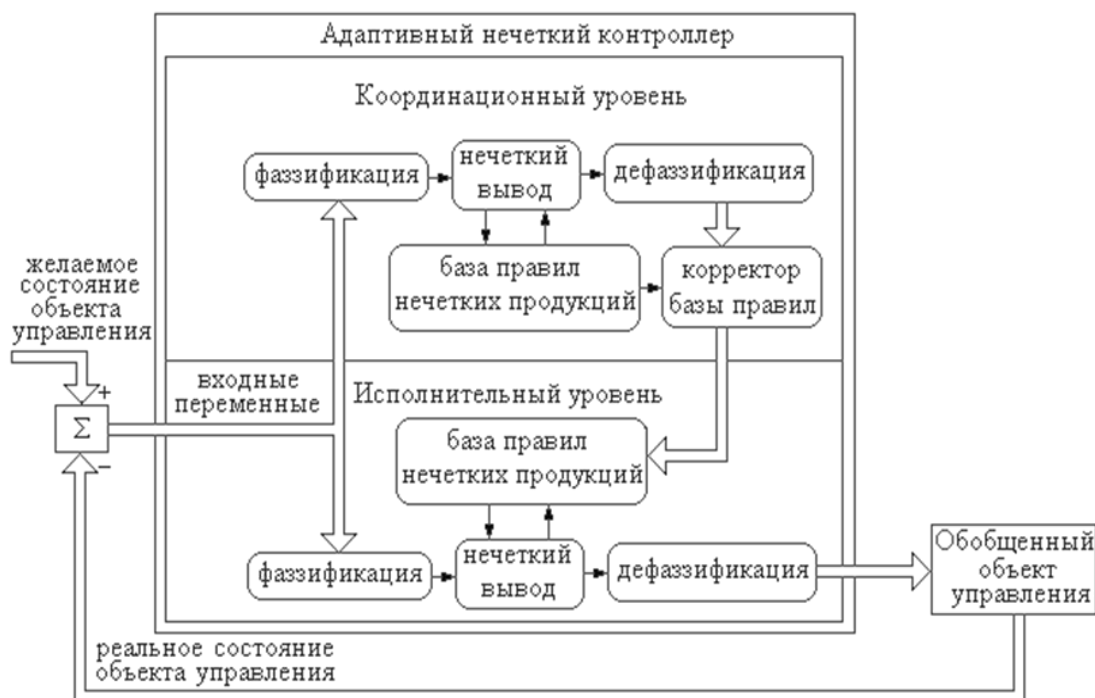


Рисунок 3 – Архитектура адаптивной нечеткой САУ

Принцип работы адаптивного нечеткого контроллера, объединяющего в своем составе координационный и исполнительный уровни управления, заключается в следующем.

При существенном изменении поведения объекта в текущей ситуации, характеризующейся различиями между реальным и желаемым состоянием объекта управления, система нечеткого вывода контроллера исполнительного уровня продуцирует управление, реализация которого уже не обеспечивает необходимого качества регулирования. В этом случае блок адаптации координационного уровня, пользуясь собственной системой нечеткого вывода, производит коррекцию продукционных правил нечеткого контроллера исполнительного уровня.

Непосредственное изменение базы правил нечеткого контроллера исполнительного уровня осуществляет корректор базы правил. Как правило, лингвистической коррекции подвергаются те продукционные правила, активизация которых привела к неадекватному управлению, с точки зрения лингвистической оценки управления, содержащейся в базе знаний координационного уровня.

Таким образом, на координационном уровне происходит нечеткая оценка управления и, при необходимости, коррекция базы продукционных правил нечеткого контроллера, т.е. фактически производится интеллектуальная оценка и коррекция поведения системы управления, которое определяется в виде нечетких продукций на исполнительном уровне.

Наиболее проблематичным в подобной системе является разработка алгоритма работы корректора базы правил координационного уровня, поскольку не существует единого метода адаптации системы нечеткого вывода исполнительного уровня, и в каждой реально введенной в эксплуатацию адаптивной нечеткой САУ этот вопрос решается индивидуально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедов Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. – М. : Энергоатомиздат, 1991.–240 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002.– 744 с.
3. Нечеткое моделирование и управление в технических системах : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашенко, И.Ю. Кудинов, А.Ф. Пашенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 208 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Современные технологические системы представляют собой сложные системы, функционирующие в условиях большой неопределённости, неполноты знаний и нечёткости описаний как самой системы, так и действующих на неё сигналов. Со временем стало ясно, что для управления такими системами уже недостаточно применения классических методов теории управления и необходимо разработка новых методов и подходов. Одним из таких подходов являются так называемые нечеткие системы управления (fuzzy-системы), основанные на нечеткой логике, разработанной профессором Лотфи Заде еще в 1965 году. Особенно эффективно применение нечетких систем управления там, где объект управления достаточно сложен для его точного описания и существует дефицит априорной информации о поведении системы. [1].

Нечеткими называют регуляторы, ориентированные на обработку нечетких правил для поиска решения задачи управления. Нечеткий регулятор включает: фаззификатор, блок правил, блок вывода и дефаззификатор.

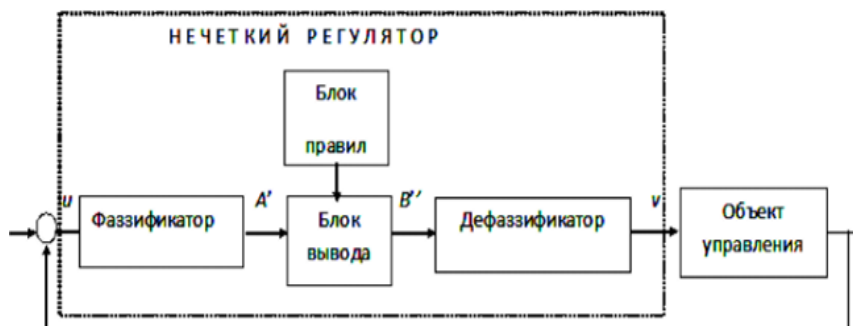


Рисунок 1 – Нечеткий регулятор

Нечеткие алгоритмы формируются на основе нечетких логических правил, поэтому в нечетком регуляторе содержится дополнительный блок, фаззификатор, выполняющий процедуру перехода от реальных (четких) переменных к лингвистическим, реальным значениям переменных ставятся в соответствие лингвистическим значениям (нечеткие множества) [2].

В блоке вывода на основе заранее сформулированных правил, которые основаны на композиционных правилах вывода, определяется нечеткое управляющее воздействие.

В дефаззификаторе вычисляется четкое управляющее воздействие:

- обучением (моделирование и, по возможности, эксперимент на реальном оборудовании);
- настройка с использованием адаптивной сети на основе нейронечеткого подхода (нейронные сети).

Можно рассмотреть следующий вариант классификации нечётких систем автоматического управления (САУ).

1. САУ с нечетким контроллером.

Замкнутая система управления с обратной связью, в прямом контуре которой в качестве регулятора используется нечеткий контроллер – устройство, опрашивающее при помощи датчиков состояние объекта управления и вырабатывающее управляющее воздействие посредством реализации одной из схем нечеткого вывода. Поскольку такое устройство только использует заранее введенные знания, полученные от экспертов на этапе проектирования и представленные в виде базы правил системы нечеткого вывода, но не обладает самостоятельной способностью к модификации базы правил, а все последующие изменения в базе правил осуществляются разработчиком извне, то такая система управления обладает минимальной степенью интеллектуальности.

2. Гибридные нечеткие САУ.

Замкнутая система управления с обратной связью, в прямом контуре которой в качестве регулятора используется гибридный нечеткий контроллер – двухуровневое иерархическое устройство, опрашивающее при помощи датчиков состояние объекта управления и вырабатывающее на первом уровне управляющее воздействие посредством реализации линейного или нелинейного закона управления, полученного методами классической ТАУ (например, ПИД-регулирование, релейный регулятор и т.п.).

На втором уровне гибридного нечеткого контроллера осуществляется адаптация параметров регулятора посредством реализации одной из схем нечеткого вывода, для которой в данном случае входными переменными являются переменные состояния объекта управления, а выходными переменными – параметры закона управления, реализованного на подчиненном уровне (например, коэффициенты усиления ПИД-регулятора). Поскольку такое устройство обладает определенной способностью приспосабливаться к изменению свойств объекта управления и самостоятельно модифицировать закон управления в соответствии с правилами, основанными на знаниях, то такая система управления обладает большей степенью интеллектуальности. Еще

большее увеличение интеллектуальности системы может быть достигнуто, если и алгоритм управления, и методы его модификации используют методы искусственного интеллекта. Этим требованиям отвечают адаптивные нечеткие САУ.

3. Адаптивные нечеткие САУ.

Замкнутая система управления с обратной связью, в прямом контуре которой в качестве регулятора используется адаптивный нечеткий контроллер – двухуровневое иерархическое устройство, опрашивающее при помощи датчиков состояние объекта управления и вырабатывающее на первом уровне управляющее воздействие посредством реализации одной из рассмотренных ранее схем нечеткого вывода. На втором уровне осуществляется коррекция базы правил системы нечеткого вывода при помощи одного из методов нечеткого вывода. Таким образом, при изменении среды функционирования нечеткой адаптивной САУ верхний уровень осуществляет интеллектуальную адаптацию системы нечеткого вывода нижнего уровня, который в свою очередь представляет устройство автоматического принятия решений на основе знаний эксперта.

Данная классификация нечетких систем является далеко не окончательной, поскольку в настоящее время ведутся работы по дальнейшему увеличению интеллектуальности нечетких САУ

Наиболее перспективным в этом плане является разработка интеллектуальных САУ, строящихся на базе нечетких нейронных сетей [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедов Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации.– М. : Энергоатомиздат, 1991.–240 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова.– М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002.– 744 с.
3. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – Москва : Высшая школа, 2002. – 183 с.

М.А. Анкуда, ст. преп.;
 Н.М. Олиферович, ст. преп.; М.К. Анкуда, ассист.;
 И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
 Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук
 (БГТУ г. Минск)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ШУМОВ В ПЛЕНОЧНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СЕНСОРЕ

Для любого процесса измерения необходимо учитывать все возможные факторы, которые будут влиять на шумовые характеристики сенсора и измерительной схемы. Что позволит оптимизировать процесс обработки данных.

При анализе шумов обычно разделяют внешние и внутренние источники шума. Для изучения внутренних источников шума необходимо проанализировать сам сенсор и его свойства. При этом полупроводниковый сенсор можно представить в виде не шумящего резистора и эквивалентного генератора напряжения внутренних шумов. На практике имеет смысл рассматривать только доминирующие шумы, к которому можно относить тепловой шум резистивного сопротивления сенсора и генерационно-рекомбинационный шум полупроводника. Напряжения источника теплового шума будет определяться [1]:

$$U_T = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f},$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – абсолютная температура, R – активное сопротивление сенсора, Δf – полоса частот, пропускаемая схемой.

А напряжение источника генерационно-рекомбинационного шума будет:

$$U_G = \sqrt{\frac{4 \cdot I^2}{N_0} \cdot \frac{\tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot \Delta f}.$$

где I – ток через полупроводниковый сенсор, N_0 – среднее равновесное число носителей заряда в полупроводниковом сенсоре, τ – среднее время жизни носителей в полупроводнике, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, Δf – полоса частот, пропускаемая схемой.

Поскольку полупроводниковый сенсор не является замкнутой или изолированной системой, то на него могут случайным образом оказывать воздействия различные электроприборы, установки и оборудование. Снижение уровня таких помех осуществляется экранированием и фильтрацией цепей питания. Однако, для сенсора, который должен взаимодействовать с окружающей средой, полное экраниро-

вание невозможно. Находясь во взаимодействии с окружающей средой, сенсор может выступать в качестве приемного устройства, на которое действуют внешние электромагнитные излучения (ЭМИ). Т.е. он становится приемной антенной для ЭМИ и в нем генерируются шумовые напряжения от внешних воздействий.

Передача электромагнитной энергии помехи от источника к полупроводниковому сенсору может осуществляться различным образом, в зависимости от пути распространения помехи.

В случае свободно распространяющихся волн уровень помех, воздействующих на сенсор, зависит от мощности источника излучения, расстояния r до источника, длины волны помехи λ , параметров среды и ряда других факторов.

В зависимости от расстояния от сенсора до источника излучения источника помех целесообразно разделить на

- ближнюю зону $r \leq \lambda/2\pi$
- дальнюю зоны $r \geq \lambda/2\pi$.

Так как электромагнитное возмущение распространяется во все стороны от диполя с одинаковой скоростью, то возникает сферический волновой фронт. Сферическая плоскость упрощает процесс определения мощности излучения электрического диполя:

$$P_{\text{изл}} = \frac{\pi}{3} \cdot I_{\text{СТ}}^2 \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

где l – длина электрического диполя; $I_{\text{СТ}}$ – ток электрического диполя; μ_0 – магнитная постоянная; ε_0 – электрическая постоянная.

При воздействии электромагнитной волны на электропроводные объекты вследствие антенного эффекта возникают высокочастотные напряжения, непосредственно или косвенно являющиеся помехами в сигнальных контурах.

Напряженность электрического поля на расстоянии x от источника ЭМИ мощностью $P_{\text{изл}}$ может быть определена из соотношения [2]:

$$E_x = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{P_{\text{изл}}}}{x}$$

Приближенно индуцируемая ЭДС в антенном элементе, которым может быть полупроводниковый пленочный сенсор, рассчитывается

$$U_W = E_x l_{\text{ef}}$$

где l_{ef} – эффективная длина антенного элемента.

Длина l_{ef} зависит от размеров устройства, обладающего антенными свойствами и длины падающей волны.

Электромагнитные поля, излучаемые отдельными участками токовых областей некоторого источника, представляют собой распространяющиеся электромагнитные волны, а результирующее поле в точке приема является суперпозицией этих волн.

Таким образом, полупроводниковый сенсор можно представить в виде шумящего резистора, эквивалентная схема которого представляет собой последовательно соединенные не шумящий резистор с сопротивлением R и эквивалентный генератор напряжения, который будет учитывать внешние и внутренние шумовые воздействия.

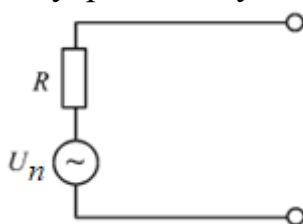


Рисунок 1 – Эквивалентная схема сенсора с генератором шумового напряжения

Среднеквадратичное значение полного шумового напряжения сенсора, приведенное к входу измерительной схемы, определяется формулой:

$$U_n = \sqrt{U_F^2 + U_G^2 + U_W^2}.$$

Поскольку источники шума являются случайными и/или имеющими гауссово распределение, суммарный шум некоррелированных источников равняется квадратному корню из суммы квадратов составляющих.

В результате получили схему замещения и электрическое описание полупроводникового пленочного сенсора с учетом наличия внутренних и внешних источников шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Определение шумовой составляющей сигнала в измерительных преобразователях для полупроводниковых сенсоров / М. А. Анкуда, Д. С. Карпович, Н. М. Олиферович // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 350-354.

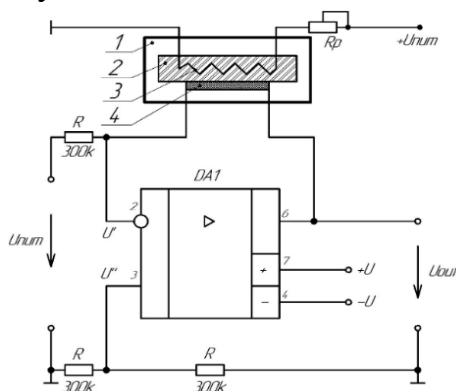
2. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

М.А. Анкуда, ст. преп.; Н.М. Олиферович, ст. преп.;
М.К. Анкуда, ассист.; И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук (БГТУ г. Минск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПЛЕНОЧНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СЕНСоре В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Принцип действия полупроводниковых пленочных сенсоров основан на изменении электрических свойств чувствительного слоя полупроводникового образца при изменении состава анализируемой газовой среды около поверхности сенсора. Выходным сигналом датчика служит величина сопротивления, которая в последующем с помощью измерительной схемы преобразуется в напряжение.

Полупроводниковый сенсор представляет собой небольшую изолирующую подложку (3×3 мм² или меньше), на которой расположены измерительные электроды и нагреватель (см. рис. 1). В полупроводниковых газоанализаторах используется эффект изменения электрического сопротивления пленок полупроводниковых материалов, возникающего вследствие физической и химической адсорбции газа. В качестве базовой схемы преобразования сопротивления в напряжение была предложена схема дифференциального усилителя на основе операционного усилителя [1].



1 – корпус чувствительного элемента; 2 – подложка керамическая;
3 – спираль нагрева; 4 – полупроводниковый чувствительный слой

**Рисунок 1 – Газоанализатор полупроводникового типа, включенный
по дифференциальной схеме измерения на базе операционного усилителя**

На поверхности полупроводникового материала существуют донорные уровни E_S , которые расположены выше уровня ферми в объеме материала. Электронные зоны проводимости стремятся заполнить поверхностные состояния. А значит теория приповерхностного

заряда позволит определить сопротивление пленки полупроводникового сенсора. В общем случае проводимость полупроводников определяется выражением [2]:

$$G_0 = K \cdot \frac{e \cdot S_k}{2 \cdot k_B \cdot T} \cdot \frac{e \cdot \mu_n \cdot E \cdot n_0}{1 + 4 \cdot \frac{\mu_n \cdot E}{v_n}} \cdot e^{-\frac{e \cdot \varphi_s}{k_B \cdot T}}$$

где K – постоянная величина, которая определяется геометрическими размерами пленки и числом проводящих зерен, S_k – площадь контакта зерен, T – температура, E – максимальная напряженность электрического поля, n_0 – концентрация электронов, v_n – средняя тепловая скорость электронов, μ_n [см²/В·с] – подвижность носителей заряда n-типа, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд, k_B – постоянная Больцмана.

При этом электрическое поле сенсора может быть подвержено внешним воздействиям.

Рассмотрим влияние внешнего электромагнитного излучения на полупроводниковый сенсор. При этом следует учесть, что анализ поля излучения обычно выполняют в сферической системе координат, в центр которой помещен излучатель (см рис. 2) [3]

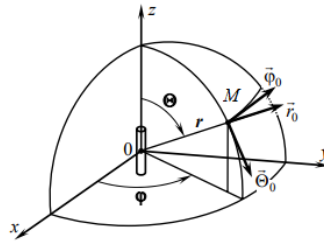


Рисунок 2 – Электромагнитное излучение диполя

Электрический диполь длиной l с однородным током I_{CT} создает напряженности полей, проекции которых определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{klI_{CT}}{2\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot \left[\frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \cdot \cos \theta \\ E_\theta &= \frac{k^2 l I_{CT}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r} \cdot \left[\frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) + \left(\frac{1}{k^2 r^2} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) \right] \cdot \sin \theta \\ H_\alpha &= \frac{klI_{CT}}{4\pi r} \cdot \left[\frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \cdot \sin \theta \\ E_\alpha &= H_r = H_\theta = 0 \end{aligned}$$

Из формул следует, что каждая компонента поля (E_r , E_θ , и H_α) имеет постоянную фазу на сферических поверхностях $r = const$, однако эти компоненты не синфазны, а их амплитуды зависят от угловой координаты θ . Это неоднородная гармоническая сферическая волна, распространяющаяся в радиальном направлении и имеющая

сложную пространственную структуру. Поле обладает осевой симметрией (отсутствует зависимость от азимутальной координаты φ), причем магнитные силовые линии – это концентрические окружности вокруг оси Z , а электрические силовые линии лежат в меридиональных областях.

Поле в дальней области имеет вид

$$E_{\theta} = \frac{k^2 I_{CT}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

$$E_r \approx 0$$

$$H_{\alpha} = \frac{k I_{CT}}{4\pi r} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

На эклектическое поле сенсора будет накладываться пол, создаваемое диполем. А также может оказывать влияние магнитное поле диполя на характеристики полупроводникового прибора посредством воздействия на движение носителей заряда, которое проявляется эффектом Холла: возникает поперечное электрическое поле (поле Холла) $\vec{E}_x$ между боковыми гранями полупроводникового образца, которое характеризуют разностью потенциалов [3].

$$E_x = \frac{R_h}{d} \cdot i \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

где $R_h = \frac{1}{n_n \cdot e}$ – коэффициент Холла, зависящий от природы вещества пластины; d – толщина пластинки в направлении магнитного поля; i – ток через пластину; α – угол между направлениями векторов магнитной индукции и электрического тока.

При этом индукция от внешнего электромагнитного возмущения будет иметь вид:

$$B = \frac{k I_{CT}}{4\pi r \mu_0} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

В полупроводниковой пластинке возникает суммарное электрическое поле $\vec{E}_x$, направление которого определяется векторной суммой:

$$\vec{E}_x = \vec{E} + \vec{E}_{\theta} + \vec{E}_x$$

Изменение электрического поля будет сказываться на величине проводимости сенсора. Поскольку внешние возмущения являются случайной величиной, то эффект будет проявляться в виде шумов, которые можно учитывать при моделировании физических процессов на поверхности сенсора и при обработке информации.

Таким образом получили математическую модель энергетических процессов, протекающих в приповерхностной области полупроводникового сенсора от действия газа на основе уравнения Пуассона с учетом внешних воздействий на электрическое поле. Что позволило

получить зависимость изменения активной проводимости приповерхностного слоя от полупроводников при адсорбции молекул газа среды в условиях внешних электромагнитных излучений.

Моделирование изменения проводимости сенсора при действии статического электрического поля в условиях генерации постоянного шумового сигнала представлено на рис. 3.

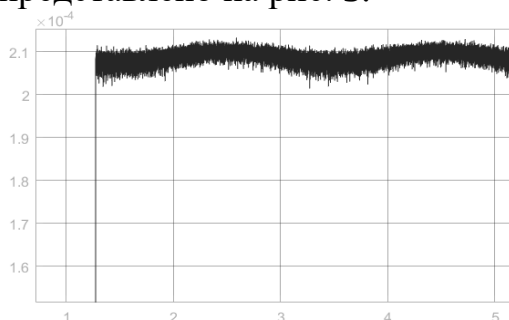


Рисунок 3 – Зависимость проводимости сенсора при статическом воздействии электрического поля в условиях внешнего электромагнитного воздействия

Таким образом получили математическую модель энергетических процессов, протекающих в приповерхностной области полупроводникового сенсора от действия газа на основе уравнения Пуассона. Что позволило получить зависимость изменения активной проводимости приповерхностного слоя от полупроводников при адсорбции молекул газа среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Определение шумовой составляющей сигнала в измерительных преобразователях для полупроводниковых сенсоров / М. А. Анкуда, Д. С. Карпович, Н. М. Олиферович // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 350-354.
2. Описание и моделирование энергетических процессов в полупроводниковом сенсоре / М. А. Анкуда [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 340-344.
3. Юдин В.И., Останков А.В. Электромагнитные поля и волны. Часть 1. Волны в безграничных и полубесконечных средах: учеб. пособие / В.И. Юдин, А.В. Останков; под общ. ред. В.И. Юдина. – Воронеж: Междунар. ин-т копыют. технологий, 20007. – 182 с.

М.А. Анкуда, ст. преп.; Н.М. Олиферович, ст. преп.;
М.К. Анкуда, ассист., И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ С ВЫХОДА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СЕНСОРОВ

Датчики физических величин, работающие на промышленных объектах, подвержены влиянию внешних электромагнитных излучений (ЭМИ), приводящих к генерации шумов и искажению измерительного сигнала. Для получения от датчика информации с наименьшими искажениями от шумовой генерации необходимо отфильтровывать высокоамплитудные импульсные или тепловые помехи, вызванные различными внешними факторами.

Большинство цифровых электроизмерительных приборов состоит из следующих частей: измерительной цепи, выполняющей необходимые аналоговые преобразования измеряемой величины, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и дешифратора (ДС), в котором кодированный сигнал преобразуется в соответствующее число и затем отображается на цифровом индикаторе или дисплее (см. рис. 1). Как правило, все блоки цифрового измерителя починяются единому блоку управления.

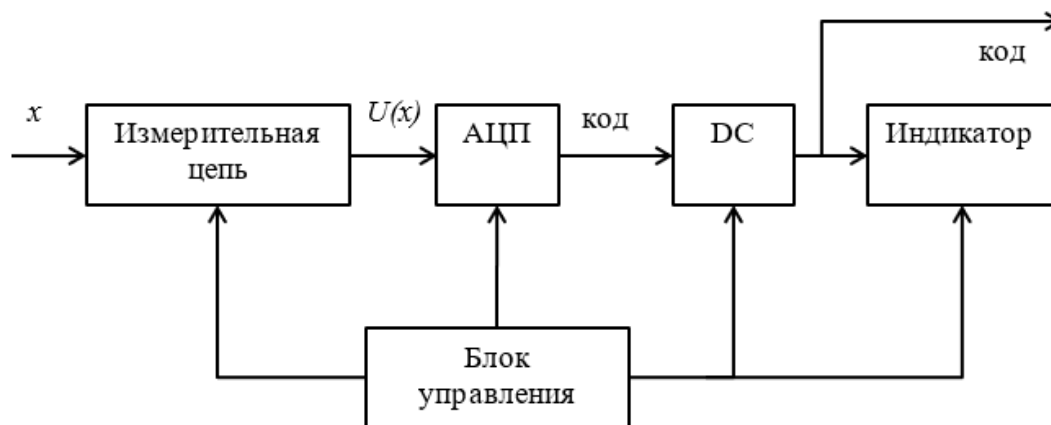


Рисунок 1 – Структура цифрового измерительного прибора

На этапе получения цифровой или аналоговой информации наиболее важным становится выделение полезного сигнала на фоне шумов, что реализуется с помощью различных схем фильтрации.

Традиционные методы фильтрации предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам, что накладывает некоторые ограничения на выбор фильтра и способы его реализации. В цифровых электроизмерительных приборах применяются цифровые филь-

тры (ЦФ), математически описываемых разностными уравнениями, в которых входная последовательность x_k преобразуется в выходную y_k [1]:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \cdot x_{k-i} + \sum_{j=0}^{n-1} b_j \cdot y_{k-j}, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Целые числа m , n , определяют порядок ЦФ, а весовые коэффициенты a_i и b_j определяют передаточную функцию фильтра.

По виду разностного уравнения определяют два класса цифровых фильтров: нерекурсивные (НЦФ), в которых выходной параметр y_k определяется только значениями входной последовательности:

$$y_k = a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_{m-1} x_{k-m+1} = \sum_{n=0}^{m-1} a_n x_{k-n}.$$

При прямой форме реализации НЦФ будет иметь структуру как на рис. 2.

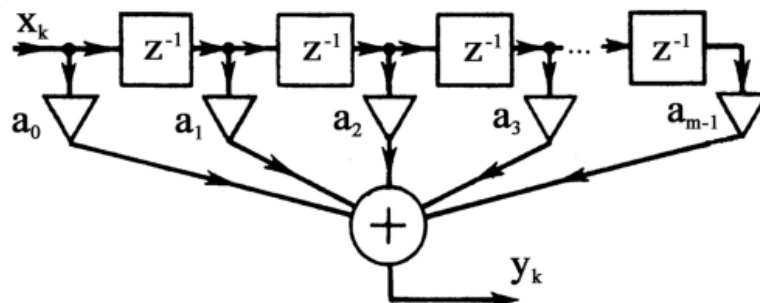


Рисунок 2 – Структура нерекурсивного цифрового фильтра

Рекурсивные (РЦФ), в которых выходной параметр y_k определяется как текущим значением x_k , так и предшествующими значениями входных и выходных последовательностей:

$$\begin{aligned} y_k &= a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots + a_{m-1} x_{k-m+1} + b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2} + \dots \\ &\quad + b_{n-1} y_{k-n+1} = \\ &= \sum_{i=0}^{m-1} a_i \cdot x_{k-i} + \sum_{j=0}^{n-1} b_j \cdot y_{k-j}, \end{aligned}$$

причем коэффициенты $b_1, b_2, \dots, b_{n-1}$, определяющие рекурсивную часть алгоритма фильтрации, не равны нулю одновременно.

Существует значительное число различных форм реализации рекурсивных фильтров. Прямая форма соответствует непосредственной реализации фильтра как на рис. 2

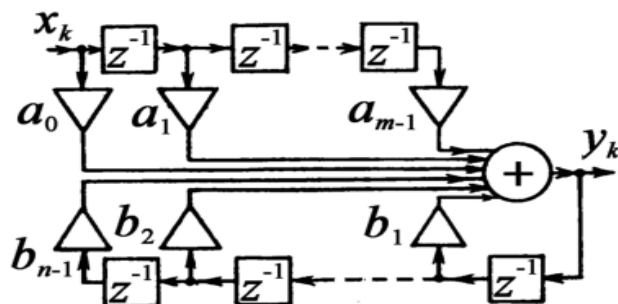


Рисунок 3 – Структура рекурсивного цифрового фильтра

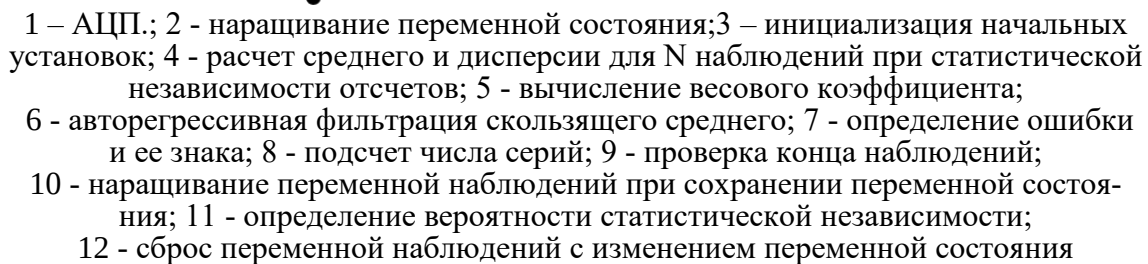
Известно, что при их соизмеримых порядках, РЦФ обладают более высокой эффективностью по сравнению с НЦФ. Однако при выборе весовых коэффициентов РЦФ необходимо обеспечить условия устойчивости.

Для обработки в режиме реального времени слабых сигналов с нестационарным характером шумов и помех в измерительной технике можно использовать адаптивные цифровые фильтры (АЦФ). В АЦФ весовые коэффициенты разностного уравнения изменяются по определенному закону с целью минимизации нежелательных (шумовых) составляющих обрабатываемого сигнала.

Применение АЦФ актуально при использовании быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). В существующих методах цифровой адаптивной фильтрации применяют фильтры скользящего среднего с изменяемыми весовыми коэффициентами, имеющие конечную импульсную характеристику (КИХ). Фильтр с КИХ требует большого объема памяти для хранения усредняемых значений и матрицы весовых коэффициентов и имеет ограниченное возрастание точности с течением времени даже при соблюдении модельных и реальных значений сигнала и шума [2]. Данный тип фильтров требует оценки устойчивости в случае нестационарности вероятностных характеристик процесса.

Поэтому возникает задача разработки альтернативного метода цифровой фильтрации, который характеризовался бы минимальным временем запаздывания при нестационарном исследуемом процессе и обладал бы бесконечной импульсной характеристикой.

В качестве решения был предложен АЦФ, который основывается на использовании критерия серий для оценки статистической независимости или тренда данных с АЦП. Функциональная схема фильтра приведена на рис. 4 [2].



Метод адаптивной фильтрации на основе критерия серий показал, что при появлении нестационарности запаздывание, соответствующее установлению нового значения, не превышает 2-3 тактов. После чего фильтр переходит в новое состояние с наращиванием времени усреднения. А наряду с высокой скоростью установления в динамическом режиме при скачке входных данных разработанный фильтр обеспечивает возрастающее с течением времени ослабление случайных погрешностей в статическом режиме, что позволяет обеспечить снижение динамических и случайных погрешностей.

1. Умняшкин, С.В. Основы теории цифровой обработки сигналов: учебное пособие / С.В. Умняшкин. – 7-е изд. – Москва: Техносфера, 2024. – 552 с.
2. Фильтр с адаптацией по вероятностному критерию / И.О. Оробей [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – Минск: БГТУ, 2020. – № 1 (230). – С. 50-56

М.А. Анкуда, ст. преп.;
И.О. Орбей, доц., канд. техн. наук;
В.В. Сарока, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

АДАПТИВНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Свойством резистивного полупроводникового сенсора, зависящим от концентрации газовой примеси, является электропроводность чувствительного слоя, в качестве которого используется поликристаллическая пленка полупроводниковых оксидов металла. Выходным аналитическим сигналом резистивного сенсора служит либо величина сопротивления чувствительного слоя, либо аналоговый сигнал по напряжению. В зависимости от типа детектируемой примеси (доноры или акцепторы электронов) и типа проводимости полупроводника (n или p -тип) сопротивление чувствительного слоя сенсора увеличивается или уменьшается.

Процесс измерения сопротивления обычно сводится к определению тока или напряжения какой-либо измерительной цепи. В настоящее время очень широкое применение находят измерительные цепи резистивных сенсоров, использующие операционные усилители. В качестве базовой схемы на основе операционного усилителя была предложена схема дифференциального усилителя, которая была выполнена на операционном усилителе M_9 (DA1) (см. рис. 1) [1].

Первичный полупроводниковый преобразователь R_0 содержит резистивный слой допированного оксида олова, который имеет чувствительность по проводимости $\Delta\sigma/\sigma \cdot 100 = 20\%/ppm$ к газовой смеси. Начальное сопротивление R_0 при отсутствии адсорбирующих газов лежит в пределах 300 ± 50 кОм. Сопротивления $R_{12} - R_{14}$ дифференциального усилителя, который выполнен на M_9 , будут равны начальному значению сопротивления R_0 .

Сопротивление на R_0 , обратно пропорциональное концентрации измеряемого газа, формирует выходное напряжение дифференциального усилителя, которое поступает на $\Delta - \Sigma$ аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП M_2 сконфигурирован как 16 разрядный в диапазоне $0 - 1,25$ В с источником опорного напряжения M_1 , генератор на M_3 , M_{4-2} , монитор питания со сторожевым таймером M_5 , однокристалльный микроконтроллер с памятью программ M_6 , индикатор M_7 , приемопередатчик сигналов интерфейса RS-232 M_8 и оптоключный переключатель режимов работы на $D_5 - D_7, T_1 - T_4$.

Циклы работы блока синхронизирует программный таймер микроконтроллера M_6 .

Программное обеспечение контроллера реализует алгоритм адаптивной цифровой фильтрации сигнала с выхода первичного преобразователя M_9 . Обычно при цифровой адаптивной фильтрации применяют фильтры скользящего среднего с изменяемыми весовыми коэффициентами, имеющие конечную импульсную характеристику (КИХ). Фильтр с КИХ требует большого объема памяти для хранения усредняемых значений и матрицы весовых коэффициентов и имеет ограниченное возрастание точности с течением времени.

Для устранения подобных недостатков был предложен алгоритм цифровой фильтрации с использованием дополнительной локальной аппроксимации некоторой длины временной последовательности квадратичной или линейной зависимостью и определением интегральных значений показателя скорости и ускорения. Полученные значения вместе с суммой квадратов отклонений позволяют спрогнозировать временной параметр для формирования выходного значения на данном такте измерения.

Суть этого метода состоит в использовании скользящих локально-параметрических моделей, в качестве которых предлагается использовать линейную и квадратичную аппроксимации:

$$\begin{aligned} y(t) &= c_1 + c_2 t \\ y(t) &= d_1 + d_2 t + d_3 t^2, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} w_2 & w_1 \\ w_3 & w_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}; \\ w_i &= (t_1)^{i-1} + (t_2)^{i-1} + \dots + (t_N)^{i-1}; \\ b_i &= (t_1 x_1)^{i-1} + (t_2 x_2)^{i-1} + \dots + (t_N x_N)^{i-1}. \end{aligned}$$

Данные уравнения является результатом применения метода наименьших квадратов и, в отличие от других весовых функций, не требует большого количества вычислений.

Для формирования выходного значения y_i может быть использовано любое значение времени t в диапазоне аппроксимации

$$t_k = [0 \quad \Delta t \quad 2\Delta t \quad \dots \quad (N-2)\Delta t \quad (N-1)\Delta t],$$

где Δt – время квантования.

Функциональная схема адаптивного фильтра приведена на рис. 2.

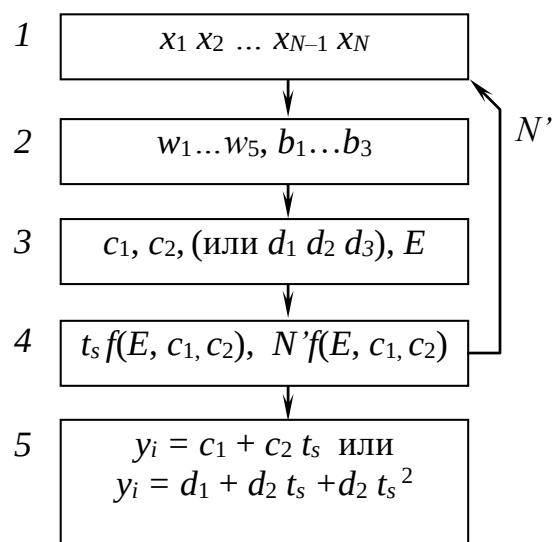


Рисунок 2 – Функциональная схема работы адаптации

Работа адаптации предполагает проведение постоянных расчетов по линейной или параболической аппроксимации. Блок 1 запоминает требуемую длину последних значений отсчетов АЦП в соответствии с окном аппроксимации N , блок 2 производит расчет значений $w_1 \dots w_5, b_1 \dots b_3$, блок 3 производит расчет c_1, c_2 (или d_1, d_2, d_3) и вычисление величины дисперсии отклонения E значений от аппроксимированных кривых. Блок 4 позволяет осуществлять выбор между линейной и квадратичной аппроксимацией и их параметрами. Блок 5 реализует аппроксимацию.

Таким образом, была получена измерительная схема с преобразователем на основе полупроводникового пленочного сенсора под управлением микропроцессорного контроллера, который позволяет производить измерения концентрации газовой смеси с реализацией адаптивной цифровой фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Измеритель концентрации газовых смесей / М. А. Анкуда, И. О. Оробей, В. В. Сарока // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 300-303.

2. Адаптивная цифровая фильтрация для обработки сигналов от полупроводниковых пленочных газовых сенсоров / И. О. Оробей [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. – Минск : БГТУ, 2022. – С. 322–324.

М.А. Анкуда, ст. преп.;
И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
В. В. Сарока, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АВТОДИННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

ЯМР-спектроскопия может быть использована для неразрушающего анализа качественных характеристик при производстве полупроводниковых пленок. При анализе полупроводниковых образцов используя ЯМР-сигналы с выхода параметрического автодинного детектора можно получить следующую информацию: структурную неоднородность пленки, наличие и концентрация примесей определенных химических компонентов, диффузионные процессы, степень кристаллизации.

Различные типы примесей дают характерные ЯМР-сигналы, что позволяет идентифицировать и количественно оценить их концентрацию и валентное состояние. При этом различие в ширине или форме линии сигнала может указывать на наличие разных типов дефектов, микронапряжений в пленке, разной ориентации кристаллов, или даже на наличие межслойных структур. Измерение динамики ЯМР-сигналов позволяет проследить за диффузионными процессами атомов в пленке, что является важным для обеспечения стабильности полупроводниковой структуры. А также по изменению интенсивности ЯМР-сигналов можно судить об изменении электронного состояния примесей или носителей заряда.

С учетом возможности применения ЯМР-спектроскопии для определения качественных характеристик полупроводниковых пленок было разработано и описано устройство, позволяющее регистрировать сигналы ЯМР, с последующей их обработкой.

Структурная схема подобного ЯМР-анализатора в упрощенной форме будет иметь вид как на рис. 1.

Образец размещается внутри катушки регистрации, которая является составной частью автодина. Система катушек будет способна принимать сигнал при наличии интенсивного постоянного магнитного поля с величиной индукции не ниже 0,13 Тл. Для получения необходимого магнитного поля было предложено использовать постоянные магниты с ярмом броневого типа, между полюсов которых и размещается система регистрирующих катушек. Систему постоянных магнитов необходимо размещать таким образом, чтобы концентрация маг-

нитного потока в рабочем зазоре с исследуемым образцом достигала необходимого уровня [1].

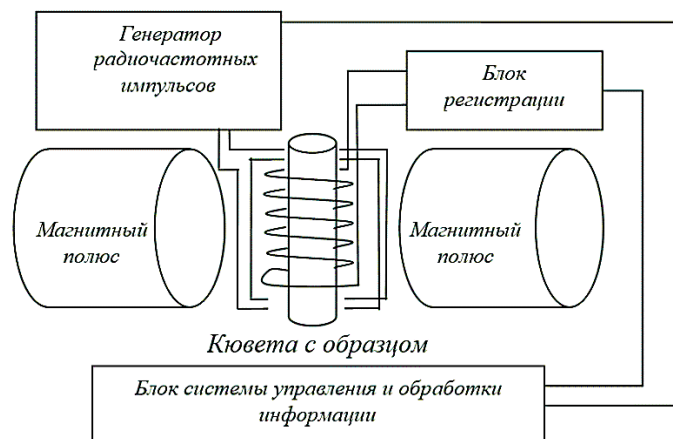


Рисунок 1 – Структурная схема ЯМР-анализатора

Выводы катушек присоединяются к платам с электронными компонентами, которые смонтированы внутри ярма магнитной системы, что позволяет уменьшить паразитные емкости и микрофонный эффект.

Под действием статического магнитного поля постоянных магнитов образец получает некоторую макроскопическую намагниченность.

Суммарный вектор намагниченности имеет то же направление, что и вектор магнитной индукции постоянного поля. Далее на обмотку подается радиочастотный сигнал, который воздействует на магнитные моменты ядер по средствам своего магнитного поля, что приводит к нутации векторов ядерной намагниченности вещества в образце.

В результате под действием вектора ядерной намагниченности в регистрирующей обмотке наводится некоторый электрический сигнал, зависящий от свойств и концентрация ядер в образце.

Любая первоначальная фиксация и обработка подобного сигнала должна проводиться аналоговыми электронными схемами.

Автодин по существу является генератор слабых высокочастотных колебаний, амплитуда которых зависит от внесённых потерь в колебательный контур за счет ядерной динамической восприимчивости образца [2]. Схема автодина с параметрическим возбуждением может быть условно разделена на несколько функциональных узлов: колебательный контур, генератор накачки и цепь обратной связи. (см. рис. 2).

В рассматриваемом генераторе в качестве переменного реактивного элемента колебательного контура используется емкость р-п перехода полупроводникового варикапа VD1; в качестве генератора накачки используется схема возведения в квадрат, которая построена на DA1.

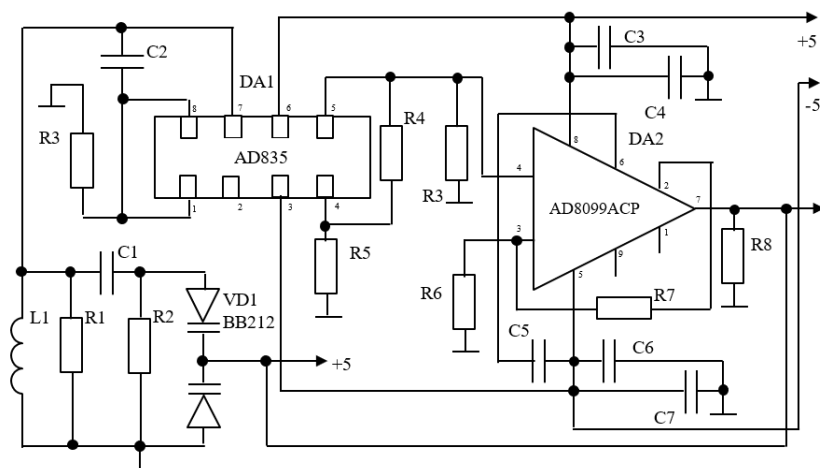


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная параметрического автодина

Поскольку в качестве опорного сигнала для параметрического изменения емкости используется непосредственно сигнал колебательного контура на удвоенной частоте, которая получается с выхода схемы умножения, то тем самым обеспечивается совпадение фаз. Обратная связь реализуется через подачу сигнала после усиления на схеме DA2 на управляющий электрод варикапы VD1.

Сигнал с выхода регистрирующей катушки имеет изначальный уровень в несколько мкВ и содержит набор определенных резонансных частот, измеряемых в диапазоне от нескольких десятков до сотен МГц, то его возможное предварительное усиление и преобразование в цифровой код является бессмысленным. Поэтому после процедуры детектирования обязательным будет переход в частотную область.

Проводя спектральный анализ сигналов, которые были получены с регистрирующей катушки, можно за относительно короткие промежутки времени определять качественные характеристики образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оробей И. О., Сарока В. В. Первичный преобразователь импульсного ЯМР-спектрометра для систем управления // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. 2002. Вып. X. С. 136 – 138.
2. Анкуда, М. А. Модель автодина с параметрическим возбуждением / М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика, 2016. – С. 127-131.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

При оценке энергоэффективности работы технологического оборудования промышленных предприятий необходимо учитывать, что доля затрат на электроэнергию в зависимости от энергоемкости производства варьируется от незначительной до существенной. По оценкам специалистов удвоение цен на электроэнергию вызывает рост цен в промышленности на выпускаемую продукцию на 6-15%. В связи с этим актуальной задачей становится переход на энергосберегающий электропривод, к которому относится вентильно-индукторный.

Применение вентильно-индукторного электропривода связано с рядом его некоторых особенностей:

- по основным массогабаритным и энергетическим показателям ВИП не уступает и даже превосходит частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Это связано с важной особенностью ВИМ – полезным использованием насыщения магнитной цепи;

- благоприятные функциональные особенности ВИП: большие моменты при низких скоростях и небольших токах, гибкое управление скоростью, широкий диапазон главного регулирования скорости – делают этот привод очень привлекательным для широких применений;

- большое разнообразие структур ВИП делают этот привод хорошо применимым как в низкооборотных (сотни оборотов в минуту), так и высокооборотных (десятки тысяч оборотов в минуту) версиях.

Итак, ВИП – серьезный конкурент современных регулируемых электроприводов без ограничения по мощности, скорости и т.д.

Также важной проблемой является определение экономии электрической энергии при замене асинхронных двигателей вентильно-индукторными. Экономичность была оценена по: сэкономленной электроэнергии (ΔW), экономии денежных средств на электроэнергию ($C_{сэ}$), сроку окупаемости ($T_{ок}$).

Исходными величинами для расчета экономичности применения ВИД на приводе электродвигателей насосов и вентиляторов явились следующие номинальные мощности асинхронного двигателя и ВИД, коэффициенты полезного действия этих двигателей, число часов работы за год, стоимость ВИД.

Экономический эффект от реализации энергосберегающего мероприятия определяли с учетом приведения к номинальному режиму эксплуатации оборудования, т. к. при трудно прогнозируемом режиме

работы оборудования и значительном его отклонении от номинального годовая экономия электроэнергии за более длительный период может существенно отличаться от расчетной.

Экономию электрической энергии при замене асинхронных двигателей на ВИД одинаковых мощностей определяем по величине снижения потерь:

Разность потерь мощности АД и ВИД:

$$\Delta P = \Delta P_{1\text{АД}} - \Delta P_{1\text{ВИД}} = P_{\text{ном}} \cdot (1/\eta_{\text{АД}} - 1/\eta_{\text{ВИД}}), \text{ кВт},$$

где $\Delta P_{1\text{АД}}$, $\Delta P_{1\text{ВИД}}$ – потребляемые мощности соответственно АД и ВИД, кВт; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателей АД и ВИД, кВт; $\eta_{\text{АД}}$ – КПД асинхронного двигателя; $\eta_{\text{ВИД}}$ – КПД вентильно-индукторного двигателя.

Экономия электрической энергии в год:

$$\Delta W = P_{\text{ном}} \cdot (1/\eta_{\text{АД}} - 1/\eta_{\text{ВИД}}) \cdot t, \text{ кВт/ч},$$

где t – число часов работы за год, $t = 4300$ час.

Стоимость сэкономленной электроэнергии в течение года:

$$C_{\text{сэ}} = \Delta W \cdot b, \text{ руб},$$

где $b = 0,23$ руб. – стоимость одного кВт·ч электроэнергии для предприятий по двухставочному тарифу (по состоянию на 1.12.2017 г).

Срок окупаемости мероприятия

$$T_{\text{ок}} = C_{\text{ВИД}} / C_{\text{сэ}}, \text{ год},$$

где $C_{\text{ВИД}}$ – стоимость ВИД, руб.

В таблице 1 и таблице 2 приведены исходные данные и оценка экономии электроэнергии при замене асинхронных двигателей вентильно-индукторными.

Таблица 1 – Использование ВИД в насосных агрегатах

№ п/п	$P_{\text{ном}}$, кВт	$\eta_{\text{АД}}$, о.е.	$\eta_{\text{ВИД}}$, о.е.	ΔP , кВт	ΔW , кВтч	$C_{\text{сэ}}$, тыс.руб	$C_{\text{ВИД}}$, тыс.руб	$T_{\text{ок}}$, год
1	2,8	0,83	0,92	2,28	9836	2,254	1,66	0,74
2	13	0,85	0,92	1,19	5117	1,177	1,69	1,45
3	14	0,85	0,94	1,57	6751	1,553	1,75	1,13
4	18,5	0,84	0,92	1,92	8234	1,894	1,80	0,95
5	18,5	0,7	0,92	6,32	27176	6,250	1,80	0,30
6	22	0,87	0,92	1,37	5891	1,355	1,82	1,35
7	30	0,88	0,94	3,31	14233	3,274	2,08	0,65
8	45	0,87	0,94	3,87	16632	3,825	2,60	0,68
9	55	0,86	0,92	4,1	17630	4,055	3,90	0,96
10	75	0,70	0,92	25,62	112875	25,961	5,85	1,62
11	90	0,79	0,94	18,18	78174	1,798	6,41	0,38
12	95	0,88	0,92	1,37	20425	4,698	8,45	1,80
13	110	0,88	0,94	8,8	37840	8,703	9,37	1,10
14	132	0,87	0,92	8,25	39732	9,158	11,70	1,30
15	160	0,87	0,94	2,87	61920	14,242	13,00	0,93

Таблица 2 – Использование ВИД в вентиляторах

№ п/п	Р _{ном} , кВт	η _{ад} , о.е.	η _{вид} , о.е.	ΔР, кВт	ΔW, кВт/ч	С _{сз} , тыс.руб	С _{вид} , тыс.руб	Т _{ок} , год
1	18	0,77	0,92	7,78	16254	3,738	1,79	0,5
2	20	0,85	0,92	1,8	7740	1,780	1,79	1,0
3	22	0,78	0,94	4,84	20812	4,780	1,82	0,4
4	22	0,68	0,92	8,36	35948	8,268	1,82	0,2
5	22	0,62	0,92	11,66	50138	11,531	1,82	0,1
6	75	0,89	0,94	4,50	19350	4,450	5,85	1,3
7	95	0,89	0,94	0,06	24510	5,637	8,45	1,5
8	100	0,89	0,94	8,36	25800	5,934	9,23	1,6
9	160	0,85	0,94	17,6	75680	17,406	12,9	0,8

Приведенные расчеты показали, что при использовании вентиляльно-индукторного электропривода наряду с техническими преимуществами этих двигателей, ВИП дает значительную экономию электроэнергии на предприятиях при небольшом сроке окупаемости.

Таким образом, применение ВИД в качестве электроприводов различного технологического оборудования является перспективным направлением в системах энергосбережения промышленных предприятий.

УДК 655.52-529

В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук;
Д.С. Карпович, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ НЕФТИ

Одной из важнейших задач в области нефтепереработки является более эффективное использование нефти для производства моторных топлив. В первую очередь это относится к более полному извлечению из нефти потенциала светлых нефтепродуктов. Возможный отбор суммы светлых нефтепродуктов зависит не только от качества нефти. Он является также функцией вырабатываемого ассортимента нефтепродуктов, так как для одновременного приготовления бензина, разных сортов бензина, разных сортов керосина и дизельных топлив, требуются одни и те же фракции нефти. Поэтому с увеличением или уменьшением отбора бензина, керосина, дизельного топлива зимнего соответственно уменьшается или увеличивается потенциал суммы светлых нефтепродуктов за счет возможного вовлечения в дизельное топливо летнего таких высококипящих фракций нефти, как 350–370°C.

Одним из решающих факторов для достижения этой цели является оптимальное управление процессом первичной переработки

нефти в колонне К-102. Это вызвано повышенными требованиями к стабилизации качества получаемых в колонне фракций и качества нефтепродуктов, существенными изменениями качества подаваемого сырья на установку, необходимостью оперативного решения задач по управлению установкой при изменении плановых заданий на отборы нефтепродуктов.

В процессе эксплуатации объекта целевые функции могут изменяться в зависимости от изменяющейся постановки задачи оптимизации. При этом для разработки алгоритма оптимизации необходимо определять зависимость выбранной целевой функции от значений параметров процесса, возмущающих и управляющих воздействий и составлять программы расчета оптимальных значений режимных параметров процесса.

При ректификации многокомпонентной смеси возмущающими воздействиями являются расход F_p , состав x_p и энергетическое состояние сырья q , управляющими воздействиями являются расход пара V и отбор дистиллятов F_{n+1} .

Задача оптимизации многокомпонентной смеси может быть сформулирована в следующей форме. Необходимо определить управляющие воздействия F_{n+1}^* и V^* , минимизирующие целевую функцию Q , при производительности не ниже заданной, себестоимости проведения процесса не выше заданной и соблюдении ограничений по качеству продукции, гидродинамической обстановке на контактных устройствах и условиях физической реализуемости.

Запишем общую задачу оптимизации МКР:

$$\begin{aligned} \min Q(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) &= Q(F_p, x_p, q, V^*, F_{n+1}^*) \\ V, F_{n+1} &\in \mathcal{U} \end{aligned} \quad (1)$$

при соблюдении ограничений

а) по качеству целевых продуктов

$$\left. \begin{aligned} x_{n+1,j}^3 &\leq x_{n+1,j}(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \\ \forall_j &\in M_1 \\ x_{n+1,j}^3 &\geq x_{n+1,j}(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \\ \forall_j &\in M_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{0,j}^3 &\geq x_{0,j}(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \\ \forall_j &\in M_3 \\ x_{0,j}^3 &\leq x_{0,j}(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \\ \forall_j &\in M_4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

б) по гидродинамической обстановке на контактных устройствах

$$\begin{aligned} V_{\max}(L) \leq V \leq V_{\min}(L) \\ L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

в) по производительности по целевым продуктам и затратам на их производство

$$F_{n+1}^3 \leq F_{n+1}(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \quad (4)$$

или

$$F_0^3 \leq F_0(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \quad (5)$$

$$c^3 \geq c(F_p, x_p, q, V, F_{n+1}) \quad (6)$$

г) по условиям физической реализуемости

$$\left. \begin{aligned} 0 < F_{n+1} < F_p \\ F_p^{\min} \leq F_p \leq F_p^{\max} \\ 0 < x_{ij} < 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Аналогично изложенному выше назовем область Y , где выполняются ограничения (1) – (2), допустимой, а $F_{n+1}^*, V^* \in U$, которым соответствует экстремум целевой функции Q^* – оптимальными.

Постановка и решение некоторых типовых задач оптимизации установок нефтехимического комплекса заключается в следующем.

Задача I. При заданном векторе возмущающих воздействий (F_p, x_p, q) минимизировать энергозатраты на производство единицы целевого продукта (в рассматриваемом случае – дистиллята)

$$\min Q = \min_{V, F_{n+1} \in \mathcal{U}} \left[\frac{1}{F_{n+1}} (\beta_1 V + \beta_2) \right] = \frac{1}{F_{n+1}^*} (\beta_1 V^* + \beta_2) \quad (8)$$

при производительности не менее заданной, выполнении ограничений по концентрациям компонентов в продуктах, заданных неравенствами (1), (6), и условиям физической реализуемости (7).

Относительно множества допустимых значений управляющих воздействий $\mathcal{U}$ предполагается (в задачах I и II), что оно не является пустым, т. е. допустимая область не является вырожденной, что проверяют при исследовании статической характеристики объекта.

Задача II. При заданном векторе возмущающих воздействий максимизировать производительность установки по выходу целевого продукта (здесь дистиллята)

$$\max_{V, F_{n+1} \in \mathcal{U}} F_{n+1} = F_{n+1}^* \quad (9)$$

при себестоимости не выше заданной (6), выполнении ограничения по концентрации компонентов в продуктах и условий физической реализуемости.

В рассматриваемой системе для обеспечения оперативности управления может быть предусмотрено восстановление кривой ИТК нефти по косвенным показателям (плотности d_4^{20} , температуре засты-

вания t_3 , вязкости ν_{20}).

Для установления зависимости между этими показателями и ИТК в условиях ОАО МНПЗ были использованы данные лабораторных анализов о процентах выкипания при различных температурах разгонки нефти.

После обработки данных с помощью аппарата множественной регрессии были получены уравнения регрессии, имеющие высокие коэффициенты множественной корреляции (в линейном варианте).

$$Y_1 = -1351.1709 + 1.6245X_1 - 1.0549X_2 - 0.8861X_3$$

$$Y_2 = -729.0468 + 0.8650X_1 - 0.0422X_2 - 0.0354X_3$$

$$Y_3 = 4160.2190 - 4.8101X_1 - 0.2532X_2 - 0.2127X_3$$

$$Y_4 = 13393.3431 - 15.5696X_1 + 0.7595X_2 - 0.8620X_3$$

Основная задача сводится к максимизации отбора светлых продуктов и формулируется как

$$y = \sum_{i \in I_c} \left(\sum_{j=1}^{p_i} \beta_{ij} u_j + \sum_{j=1}^{q_i} \gamma_{ij} K_j \right) \rightarrow \max \quad (10)$$

при

$$\underline{u}_j \leq u_j \leq \bar{u}_j, u_j \in \bar{P}_{\partial\partial},$$

$$\underline{Z}_s \leq Z_s(\bar{P}_{\partial\partial}, \bar{K}_H) \leq Z_s, S = \overline{1, k_c},$$

где I_c – множество светлых продуктов (бензин, керосин и дизельное топливо); p_i и q_i – соответственно количество управляющих воздействий и показателей качества нефти в моделях; u_j – управляющие воздействия (температуры 1-го и 2-го перетоков из К-102 в стриппинги, температуры левого и правого потоков на выходе из печи П-101, температуры низа и верха К-102), на которые накладываются позиционные ограничения; K_j – показатели качества нефти; β_{ij} и γ_{ij} – коэффициенты регрессии; Z_s – показатели качества светлых продуктов (температуры начала и конца кипения, вспышки и застывания), которые имеют вид регрессионных моделей; $\bar{P}_{\partial\partial}$ – вектор режима атмосферной части установки ППН; $\bar{K}_H$ – вектор показателей качества нефти; k_c – количество показателей качества светлых продуктов.

Благодаря использованию линейного описания процесса для решения задачи оптимизации оказалось возможным использовать метод линейного программирования (ЛП), когда в модели, используемой в задаче оптимизации, имеется показатель качества нефти, его текущее значение умножается на соответствующий коэффициент и результат суммируется со свободным членом, т. е. корректируется свободный член модели:

$$\gamma_{0i}^* = K_j \gamma_{ij} + \gamma_{0i},$$

где γ_{0i} – свободный член уравнения регрессии без учета качества нефти. Затем формируется массив ограничений и решается задача оптимизации.

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Процесс первичной переработки нефти в колонне К-102 имеет m входных величин и n выходных величин. Между входными и выходными величинами существуют внутренние динамические связи, вид которых определяется соответствующими динамическими характеристиками.

Динамическая характеристика связи между i -м входом и j -м выходом определяется передаточной функцией W_{ij} . Тогда динамическая система будет иметь $m \times n$ характеристик. Они образуют характеристическую матрицу:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1m} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2m} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \cdots & W_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

описывающую все динамические свойства системы.

В данном случае передаточные функции W_{ij} определяются методами статистической динамики по данным нормальной эксплуатации объекта.

При определении динамических характеристик по записям, полученным в процессе нормальной эксплуатации исследуемого объекта методом корреляционных функций применяется метод моментов.

Моменты импульсной характеристики могут быть вычислены по корреляционным функциям.

Для этой цели использовались экспериментальные данные о параметрах процесса ректификации в колонне К-102, полученные путем непрерывных измерений его параметров в течение 12 часов с дискретностью 23 секунды. Общее количество измерений – 2000 по каждому параметру процесса.

Качество целевых продуктов разделения по их температурам выкипания, представляющих основные фракции – головной погон НК–140°C, боковой погон 140-180°C, боковой погон 180-230°C, боковой погон 230-360°C, нижний (кубовый) продукт – мазут, по температурам их кипения в настоящее время в автоматическом режиме не контролируются. Поэтому в качестве косвенных параметров в некоторой мере, отражающих качество данных фракций, можно принять следующие параметры: температуру верха колонны (y_1) (для головного погона) и температуры тарелок, с которых боковые погоны выво-

дятся каждый в свою отпарную колонну (стриппинг-секцию), а именно, температура на 29 тарелке (y_2) – соответствует качеству фракции 140-180°C, температура на 17 тарелке (y_3) – качеству фракции 180-230°C, температура на 6 тарелке (y_4) – качеству фракции 230-360°C, температура низа колонны (y_5) – качеству мазута. Данные параметры для колонны К-102 являются выходными регулируемыми величинами.

К основным управляющим параметрам колонны можно отнести расход острого орошения (u_1), расход верхнего циркуляционного орошения (u_2), расход 1 циркуляционного орошения (1ЦО) (u_3), расход второго циркуляционного орошения (2ЦО) (u_4), расход водяного пара в колонну (u_5).

Отбензиненная нефть подается из колонны К101, нагретая в П-100, 101 до определенной температуры, подается в исследуемую колонну по двум трансферным линиям. Поэтому расход нефти (x_3) и ее температура (x_2) являются вероятностными величинами и их можно отнести к основным возмущающим воздействиям. Также к данной группе параметров можно отнести уровень среды в колонне К-102 (x_1).

Динамические характеристики по каналам управления ректификационной колонны можно представить в виде передаточных функций первого порядка с запаздыванием следующего вида:

$$W_{ij}(p) = \frac{y_{ij}(p)}{x_{ij}(p)} = \frac{k_{ij} e^{-\tau_{ij} p}}{T_{ij} p + 1} \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}), \quad (2)$$

где $y_{ij}(p)$ – преобразованное по Лапласу значение выходной (регулируемой) величины канала управления; $x_{ij}(p)$ – преобразованное по Лапласу значение входной (регулирующей, возмущающей) величины; k_{ij} , τ_{ij} , T_{ij} – соответственно коэффициент передачи, время запаздывания и постоянная времени канала управления по i -ой входной и j -ой выходной переменным.

Согласно применяемому методу моментов зависимость (2) для любого канала может быть представлена в следующем виде:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} = H_0 - pH_1, \quad (3)$$

где H_0 , H_1 – соответственно нулевой и первый моменты импульсной характеристики.

При этом момент H_0 соответствует коэффициенту передачи для данного канала управления, т.е.

$$k = H_0 \quad (4)$$

Из соотношения (3) определим выражение для постоянной времени T .

$$k = (H_0 - pH_1)(Tp + 1) \quad (5)$$

$$k = H_0 T p + H_0 - H_1 T p^2 - p H_1 \quad (6)$$

Так как для передаточной функции первого порядка $H_1 T p^2 = 0$ и $k = H_0$, то из уравнения (6) можно получить

$$T = \frac{H_1}{H_0} \quad (7)$$

Значения H_0 , H_1 для каждого канала управления определяются по следующим формулам

$$H_0 = \frac{B_0}{A_0} \quad (8)$$

$$H_1 = \frac{B_1}{A_0}, \quad (9)$$

где A_0 – момент нулевого порядка корреляционной функции; B_0 , B_1 – соответственно моменты нулевого и первого порядка взаимокорреляционной функции.

По формулам (8), (9) и (7) были рассчитаны параметры k_{ij} , T_{ij} передаточной функции (3) для всех каналов управления. Таким образом, характеристическая матрица (1) для данного объекта управления имеет вид, приведенный ниже.

По матрице можно определить передаточную функцию по любому каналу управления (u_i , $x_i - y_j$) на пересечении соответствующего i -й строки и j -го столбца матрицы.

$$W_{ij}(p) = \begin{pmatrix} \begin{matrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ \frac{-0.36676}{1.15p+1} & \frac{3.2351}{0.32p+1} & \frac{-2.1917}{1.47p+1} & \frac{-0.49141}{2.23p+1} & \frac{-2.2527}{1.37p+1} \\ \frac{0.011556}{0.69p+1} & \frac{-0.18761}{1.88p+1} & \frac{0.016438}{0.68p+1} & \frac{-0.00045435}{2.04p+1} & \frac{0.026436}{3.24p+1} \\ \frac{0.0019557}{1.86p+1} & \frac{-0.24339}{1.03p+1} & \frac{-0.027777}{1.9p+1} & \frac{-0.030462}{1.64p+1} & \frac{-0.01529}{2.01p+1} \\ \frac{0.010395}{3.74p+1} & \frac{1.9917}{0.67p+1} & \frac{0.10417}{2.31p+1} & \frac{0.16239}{1.05p+1} & \frac{0.10291}{0.8p+1} \\ \frac{-0.1793}{2.46p+1} & \frac{-27.858}{0.54p+1} & \frac{-1.3252}{1.08p+1} & \frac{-2.5496}{0.27p+1} & \frac{-1.7112}{2.24p+1} \\ \frac{0.012014}{2.65p+1} & \frac{-0.68163}{1.19p+1} & \frac{-0.13121}{0.74p+1} & \frac{-0.1104}{1.14p+1} & \frac{-0.082605}{2.55p+1} \\ \frac{0.020679}{1.1p+1} & \frac{9.0532}{0.78p+1} & \frac{1.8705}{2.99p+1} & \frac{1.6276}{1.54p+1} & \frac{1.6168}{2.32p+1} \\ \frac{-0.0088143}{5.29p+1} & \frac{-2.8502}{1.15p+1} & \frac{-0.16893}{1.76p+1} & \frac{-0.24814}{1.82p+1} & \frac{-0.18611}{3.05p+1} \end{matrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} \end{pmatrix}.$$

Для определения степени связности данной многосвязной системы применена матрица Бристоля. Исходная матрица передаточных коэффициентов $G(0)$ для исследуемой системы имеет вид:

$$G(0) = \begin{bmatrix} -0.36676 & 3.2351 & -2.1917 & -0.49141 & -2.2527 \\ 0.011556 & -0.18761 & 0.016438 & -0.00045435 & 0.026436 \\ 0.0019557 & -0.24339 & -0.027777 & -0.030462 & -0.01529 \\ 0.010395 & 1.9917 & 0.10417 & 0.16239 & 0.10291 \\ -0.1793 & -27.858 & -1.3252 & -2.5496 & -1.7112 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Для вычисления матрицы Бристоля матрицу $G(0)$ необходимо привести к нормированному виду, чтобы для всех ее элементов выполнялось условие

$$-1 \leq \lambda_{ij} \leq +1$$

При этом значение -1 или $+1$ должно соответствовать наибольшему коэффициенту передачи по каналам управления для величины u_i .

Матрица нормированных передаточных коэффициентов имеет вид:

$$G(0)_H = \begin{bmatrix} -1 & 0.11613 & -1 & -0.19274 & -1 \\ 0.03151 & -0.0067347 & 0.0075003 & -0.0001782 & 0.011735 \\ 0.0053325 & -0.0087368 & -0.012674 & -0.011948 & -0.0067873 \\ 0.028342 & 0.071494 & 0.047528 & 0.06369 & 0.045685 \\ -0.48887 & -1 & -0.60464 & -1 & -0.7596 \end{bmatrix}.$$

Проведено вычисление матрицы Бристоля, которая имеет вид:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0.0036592 & -0.0053325 & -0.0054625 & 0.48887 \\ 0.0036592 & 4.5356e-005 & -6.5529e-005 & -1.274e-005 & -0.011735 \\ -0.0053325 & -6.5529e-005 & 0.00016062 & -0.00056785 & 0.0041039 \\ -0.0054625 & -1.274e-005 & -0.00056785 & 0.0040565 & -0.045685 \\ 0.48887 & -0.011735 & 0.0041039 & -0.045685 & 0.57699 \end{bmatrix}.$$

Анализ матриц $G(0)_H$ и Λ показывает, что довольно затруднительно выделить контуры регулирования (т.е. пары $u_i - y_j$), так как имеются очень сильные взаимосвязи между переменными. Поэтому для эффективного управления такими объектами необходимо применение систем многосвязного регулирования.

Решение всех вышеприведенных задач по определению статических и динамических характеристик объекта проводилось с использованием специализированного пакета программ Matlab и его приложений.

СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ

Процесс сушки концентрата КС1 в барабанной сушилке по группам действующих на него параметров можно представить следующей схемой (рисунок 1)

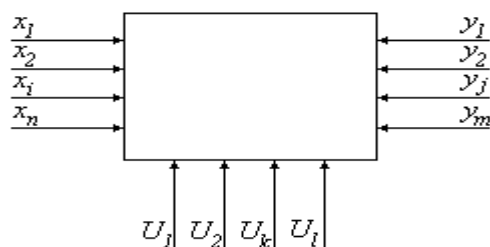


Рисунок 1 – Структурная схема ХТП

где $x_1, \dots, x_n$ – входные контролируемые параметры, $U_1, \dots, U_n$ – управляемые параметры, $y_1, \dots, y_m$ – выходные параметры, которые являются суммарным действием входных и управляемых параметров.

Статическая оптимизация заключается в определении нового наилучшего состояния объекта, если это вызывается необходимостью при изменении вектора входных параметров.

Сформируем критерий оптимизации для данного процесса:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x, U_1, U_2) \rightarrow \max \\ y_2 = f_2(x, U_1, U_2) \rightarrow y_{2\text{зад}} \\ U_{1\min} \leq U_1 \leq U_{1\max} \\ U_{2\min} \leq U_2 \leq U_{2\max} \\ X_{i\min} \leq X \leq X_{i\max} \end{cases} \quad (1)$$

где y_1 – температура высушенного материала, y_2 – температура отходящих газов, U_1 – расход газа, U_2 – температура в камере смешения, x – расход материала

Решение задачи оптимизации будем искать в виде:

$$U_{1\text{опт}} = U_1^*(x) \quad (2)$$

$$U_{2\text{опт}} = U_2^*(x) \quad (3)$$

Для реализации алгоритма оптимизации необходима разработка статической модели процесса.

В условиях действующего промышленного процесса сушки целесообразно получение модели статики (уравнение регрессии) при пассивном эксперименте с применением метода регрессионного анализа в матричной форме.

Представим исходный статистический материал в матричной форме. Будем называть матрицу

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{012} & \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & \dots & x_{kN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

матрицей независимых переменных, а матрицу-столбец

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

вектором наблюдений, Введем матрицу-столбец коэффициентов

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

Вектор-столбец коэффициентов B (6) определяется следующим образом:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

Для оценки адекватности уравнения регрессии используется неравенство:

$$F_p = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} \geq F_T(g, f_1, f_2) \quad (8)$$

где F_p и F_T – расчетное и табличное значения критерия Фишера.

Для определения модели статистики барабанной сушкилики принимаем следующее нелинейное уравнение регрессии

$$y_{j,x} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i x_j \quad (9)$$

где: y_1 – температура материала на выходе; y_2 – температура отходящих газов; x_1 – расход газа; x_2 – расход материала; x_3 – температура в камере смешивания.

Данные, полученные в ходе эксперимента составили 120 опытов. С учетом динамических свойств объекта и независимости величин y_i в опытах время между опытами принято 30 мин.

Для нахождения коэффициентов уравнения статистики по формуле (9) использовался математический пакет Matlab.

Уравнение регрессии относительно y_1 имеет вид:

$$y_1 = 76.04 + 0.0895x_1 + 0.219x_2 + 0.227x_3 - 3.113 \cdot 10^{-5}x_1^2 - 0.000635x_2^2 - 0.00037x_3^2 - 0.0008885x_1x_2 + 8.242 \cdot 10^{-5}x_1x_3 + 0.00116x_2x_3 \quad (10)$$

Проверку уравнения на адекватность проведем с использованием соотношения (1).

Табличное значение критерия Фишера $F_T = 1.2238$.

Вычисленное значение $F_p = 5.41$

Сравнивая два этих значения на основании (1) приходим к выводу, что уравнение регрессии (10) является адекватным.

Уравнение регрессии относительно y_2 примет вид

$$y_2 = -46.3458 - 0.05x_1 + 3.726x_2 + 0.567x_3 - 2.059 \cdot 10^{-5}x_1^2 + 0.0086x_2^2 - 0.0005x_3^2 - 0.00316x_1x_2 + 0.00023x_1x_3 - 0.003x_2x_3 \quad (11)$$

Проверку уравнения на адекватность проведем также с использованием соотношения (8).

Табличное значение критерия Фишера $F_T = 1.2238$.

Вычисленное значение равняется $F_p = 5.857$.

На основании (8) приходим к выводу, что уравнение регрессии является адекватным.

Для реализации алгоритма оптимального управления воспользуемся пакетом Optimization Toolbox, входящим в состав математического пакета MatLab.

Optimization Toolbox позволяет решать ряд оптимизационных задач, в которых минимизируемая функция нелинейна, и к линейным ограничениям добавляются нелинейные.

$$\min f(x) \text{ или } \max -f(x) \quad (12)$$

Наличие ограничений задаются в виде

$$Ax \leq b \quad (13)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (14)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (15)$$

Общая постановка задачи нелинейного программирования такова: требуется разыскать (10) среди всех векторов x , удовлетворяющих системе линейных ограничений (13-15) и дополнительных неравенств и равенств

$$c(x) \leq 0; c_{eq}(x) = 0 \quad (16)$$

Решение поставленной задачи производится при помощи функции `fmincon`.

В данном случае она имеет вид:

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (17)$$

Составлена и реализована программа статической оптимизации процесса сушки. В результате, на основании критерия оптимизации (1) и математической модели (10, 11) получены следующие оптимальные значения управляющих параметров $U_{1\text{опт}}$ и $U_{2\text{опт}}$, значения которых приведены в таблице.

Таблица

$x, \text{ т}$	$U_{1\text{опт}}, \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$	$U_{2\text{опт}}, ^\circ\text{C}$
50	874.74	519.4
60	895.8	521.7
70	922.23	524.5

О.И. Александров, доц., канд. техн. наук;
 Д.В. Островская, асп. (БГТУ, г. Минск);
 Т.Е. Жуковская (БНТУ, г. Минск)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО РЕЖИМАМ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Уравнения узловых напряжений традиционно применяются при расчетах установившихся режимов электрических систем. Процедура формализуется на основе аналитического представления конфигурации схемы замещения с помощью топологических матриц инцидентий. Из законов Ома и Кирхгофа вытекает метод формирования математических моделей установившегося режима узловых напряжений, который является основным методом, используемым для составления системы уравнений установившегося режима. Чтобы получить такую систему, достаточно для каждого из узлов электроэнергетической системы записать уравнения первого закона Кирхгофа, а затем токи ветвей заменить с помощью напряжений прилежащих узлов.

Для определения текущих установившихся режимов энергосистемы РБ был разработан алгоритм расчета высоковольтной сети Белорусской энергосистемы. Схема содержит 100 узлов и 100 ветвей. Для кодировки используется программа «МО excel». Книга Excel состоит из листов. Лист – рабочая область в окне. Его элементы представлены и подписаны на рисунке 1.

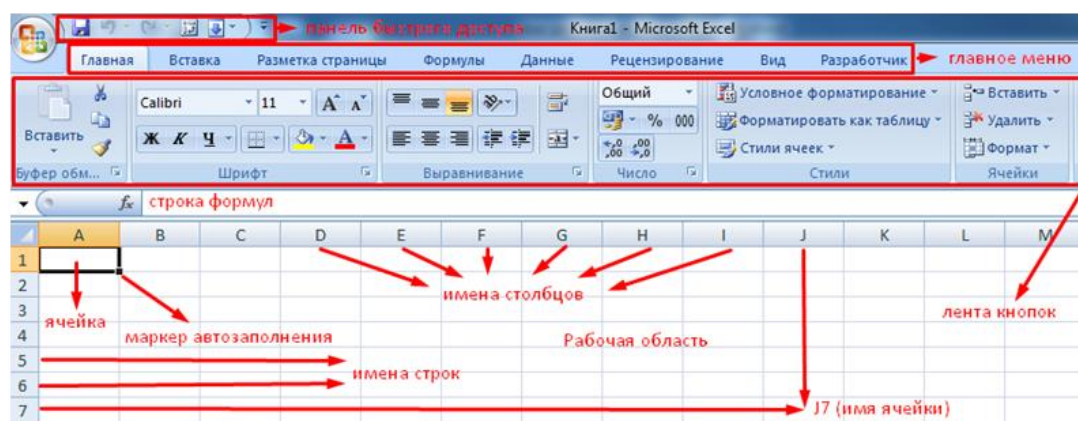


Рисунок 1 – Рабочая область Excel. Топологическая матрица инцидентий

1. Размер топологической матрицы зависит от числа её ветвей и узлов, а также способа соединения ветвей между собой. Число столбцов равно числу ветвей, а число строк – числу узлов. В результате образуется матрица токов M размером $|x \times y|$, где x – количество строк (узлов) и y – количество столбцов (ветвей). Схема основной электрической сети Белорусской энергосистемы представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема высоковольтной электрической сети Белорусской энергосистемы

2. Ниже матрицы M составляется матрица сопротивлений Z , значения активных сопротивлений ветвей которой вписываются по диагонали. В результате получаем диагональную матрицу размером $|x \times y|$.

3. Проводится транспонирование матрицы токов M . Транспонирование матрицы – это операция над матрицей, при которой ее строки и столбцы меняются местами. Для этой операции в «МО excel» существует специальная функция ТРАНСП() или англ. TRANSPOSE.

Матрица « M » имеет размер $|x \times y|$, после ее транспонирования в матрицу MT она будет иметь размер $|y \times x|$. Поочередно выполняются следующие комбинации.

а) В строке формул (ниже матрицы сопротивлений ветвей) необходимо ввести формулу ТРАНСПО).

б) Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы M .

в) В ячейке, которая предназначена для ввода результата, отображается некорректное значение в виде ошибки «#ЗНАЧ!». Это связано с особенностями работы операторов массивов.

Что бы исправить эту ошибку, выделяется диапазон ячеек, в котором число строк должно быть равным количеству столбцов первоначальной матрицы « M », а число столбцов – количеству строк. Подобное соответствие очень важно для того, чтобы результат отобразился корректно. При этом, ячейка, в которой содержится выражение «#ЗНАЧ!» должна быть верхней левой ячейкой выделяемого массива и именно с неё следует начинать процедуру выделения, зажав левую кнопку мыши.

г) После того, как проведено выделение, устанавливается курсор в строку формул сразу же после выражения оператора ТРАНСП, ко-

торое должно отразиться в ней. После того, чтобы произвести вычисления, нужно нажать комбинацию Ctrl+Shift+Enter.

д) После этих действий матрица отобразилась так, как необходимо, то есть, в транспонированном виде МТ с размерами $|y \times x|$.

4. Строится диагональная матрица проводимостей $Y1$ ($Y1 = Z^{-1}$), которая является обратной матрицей сопротивлений всех ветвей Z . Вычисление обратной матрицы в «МО excel» возможно если первичная матрица является квадратной, т. е. количество строк равно числу столбцов $|y \times y|$. Для вычисления применяется функция массива МОБР. Прежде всего вычисляется имеет ли первичный диапазон обратную матрицу или нет. Для этого используется функция МОПРЕД.

Выделяется любая пустая ячейка на листе, куда будут выводиться результаты вычисления. Нажав на кнопку «Вставить функцию», находится функция «МОПРЕД» и нажимается «ОК».

Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы Z на листе.

Программа производит расчет определителя, который должен быть не тождественен нулю. Это одно из условий для вычисления обратной матрицы, которое позволяет сказать, что у данной матрицы существует обратная.

Теперь выполняется непосредственный расчет обратной матрицы. Выделяется ячейка, которая должна стать верхней левой ячейкой обратной матрицы. Клавиша: «Вставить функцию», размещенную около строки формул. Определяется функция «МОБР» и активизируется «ОК».

Далее вставляется запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую клавишу мыши, выделим диапазон матрицы Z .

В результате появляется значение только в одной ячейке, в которой была формула. Однако нужна полноценная обратная функция, поэтому следует скопировать формулу в другие ячейки. Выделяется диапазон, равнозначный по горизонтали и вертикали исходному массиву данных. Жмется функциональная клавиша F2, а затем набирается комбинация Ctrl+Shift+Enter. Обратная матрица вычислена. Получена матрица размером $|y \times y|$.

5. Далее определяется матрица узловых собственных и взаимных проводимостей узлов $Y2$. Для этого перемножается матрица M на матрицу $Y1$. Полученный результат умножается на транспонированную матрицу МТ. Получаем уравнение $Y2 = (M \cdot Y1) \cdot МТ$.

Для умножения матриц в «МО excel» существует функция МУМНОЖ().

В этом окне имеется два поля для ввода адресов матричных массивов. Ставится курсор в поле «Массив1» и, зажав левую кнопку мыши, выделяется вся область первой матрицы M . После этого её координаты отобразятся в поле. Ставится курсор в поле «Массив2» и аналогичным образом выделяется диапазон второй матрицы. Далее жмем комбинацию кнопок $\text{Ctrl}+\text{Shift}+\text{Enter}$.

Полученную матрицу еще раз аналогичным способом необходимо умножить на транспонированную матрицу M^T . В результате получена матрица проводимостей узлов Y_2 размером $|x \times x|$.

6. Вычисляется матрица узловых собственных и зонных сопротивлений Z_2 . Сопротивление узлов Z_2 , есть обратная матрица проводимостей узлов, т. е. $Z_2 = Y_2^{-1}$. Следовательно, необходимо провести действия, аналогичные пункту 4, однако на этот раз можно исключить функцию «МОПРЕД».

Для этого выделяем любую пустую ячейку на листе, куда будут выводиться результаты вычисления. Жмется кнопка «Вставить функцию», размещенную около строки формул. Ищется «МОБР» и нажимается «ОК». Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливаем курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы Y_2 на листе. Далее выделяется диапазон, равнозначный по горизонтали и вертикали исходному массиву данных. Жмется функциональная клавиша F_2 , а затем набирается комбинация $\text{Ctrl}+\text{Shift}+\text{Enter}$. Матрица сопротивлений узлов найдена и имеет размер $|x \times x|$.

7. Далее вычисляется матрица распределения токов C . Для определения матрицы токов сначала умножается матрица проводимость ветвей Y_1 на матрицу транспонированную M^T с помощью функции $\text{МУМНОЖ}()$ (аналогично П. 5). Полученная матрица размером $|y \times x|$ снова умножается с помощью функции $\text{МУМНОЖ}()$ на матрицу сопротивлений узлов Z_2 . В итоге получается матрица распределения токов C размером $|y \times x|$.

8. По имеющимся данным мощностей в узлах составляется столбцовая матрица потоков мощностей в узлах $S_{уз}$. В итоге получается матрица размером $|x \times 1|$.

9. Для расчета матрицы мощностей в ветвях S выделяется свободная ячейка и с помощью функции $\text{МУМНОЖ}()$ умножаем матрицы. В ячейку «Массив1» вставляем диапазон значений матрицы распределения токов C , а в ячейку «Массив2» - диапазон значений матрицы потоков мощностей в узлах $S_{уз}$. Получается матрица потоков мощностей в ветвях S размером $|y \times 1|$.

С использованием приведенной методики могут выполняться расчеты реальных режимов для Белорусской энергосистемы, рассчитываться оптимальное распределение потоков мощности в высоко-

вольтной сети Белорусского энергообъединения для различных режимных состояний энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные технические требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии. Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков: утв. решением ЭЭС СНГ от 12.10.2015. – Режим доступа: <http://energo-cis.ru/gumain4223/9>. – Дата доступа: 16.09.2022.
2. Александров, О. И. Оценка балансовой надежности дефицитной энергосистемы / О. И. Александров, Н. В. Радоман, Т. Е. Жуковская // Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 9–18.
3. Концепция регулирования частоты и перетоков в энергообъединении стран СНГ и Балтии [Электронный ресурс]: утв. решением ЭЭС СНГ от 27.10.2005. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118098>. – Дата доступа: 16.09.2022.

УДК 621.311.1

О.И. Александров, доц., канд. техн. наук;
А.А. Кадыко, асп. (БГТУ, г. Минск);
Т.Е. Жуковская (БНТУ, г. Минск)

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ СЕЗОННЫХ РЕЖИМОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В современных условиях перехода к рыночным отношениям многих предприятий неизменно возрастает роль оптимизации расчетов в энергетике. Переход от директивных методов распределения топлива к экономическим при неуклонном росте цен на энергоносители влечет за собой ряд принципиальных трудностей и предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач. К их числу относятся: оптимизация распределения активной мощности между электростанциями энергосистемы с учетом потерь в сети и удельных расходов топлива; учет ограничений по поставкам топлива; режимно-экономическое взаимодействие генерирующих и потребляющих предприятий с учетом регулирующего эффекта нагрузки; выравнивание графиков нагрузки энергосистемы и промышленных предприятий; оперативное управление электропотреблением с оптимизацией режима работы системных потребителей-регуляторов.

В качестве одного из основных критериев оценки рационального использования топливно-энергетических ресурсов на всех стадиях

производства и совершенствования технических процессов выступают оптимальные удельные нормы энергопотребления, которые являются производными от технологического процесса – его производительности и энергетических показателей [1].

При рассмотрении вопросов оптимального планирования различного рода переключений в ЭЭС неизбежно возникает необходимость оценки выбранных рабочих вариантов с точки зрения их режимно – топологической пригодности. Варианты, подлежащие рассмотрению, должны удовлетворять, прежде всего, простейшим, но жестким ограничениям, а именно, условию связности схемы электрической сети и условиям бесперебойного электроснабжения потребителей узлов соответствующих категорий. Кроме того, должна быть оперативно получена ускоренная оценка рассматриваемого режима. При этом, ввиду ограниченного времени, отводимого для принятия решений по автоматизированному планированию электрических режимов, возрастают требования к соответствующим алгоритмам с точки зрения их быстродействия, надежности, гибкости и гарантированности получения результатов практически при любых наборах исходных данных [2].

В ходе оперативного управления режимами ЭЭС часто возникает необходимость проведения многократных расчетов потокораспределения при изменяющихся расчетных условиях с максимально возможным быстродействием. Разработанные до настоящего времени методы позволяют проводить либо итерационные расчеты, при которых не всегда гарантируется надежность получения результатов либо приближенные, гарантирующие получение результатов, но с заранее неизвестной погрешностью. Кроме того, область применения приближенных расчетов пока еще достаточно неизученная.

После выполнения расчёта потокораспределения проводится проверка режимных параметров на соответствие их режимным ограничениям, и в случае их отклонения происходит обращение к алгоритмам оперативной коррекции сетевых и режимных параметров. При необходимости проводится дорасчёт неизвестных параметров режима с использованием соответствующего алгоритма расчёта неизмеряемых параметров режима электрической сети по неполной совокупности телеизмерений, после чего выполняется оперативная режимно-топологическая оценка надёжности и резервирования в ЭЭС.

В общем виде задачу комплексной оптимизации режимов ЭЭС с учетом вариации нагрузок можно сформулировать следующим образом. Необходимо минимизировать некоторую функцию, являющую собой эксплуатационные затраты, с учётом соответствующих ограничений в заданном временном интервале t . Обычно при оптимизации режимов в качестве целевой функции принимаются суммарные экс-

плутационные издержки $\mathbf{I}$ в ЭЭС, зависящие нелинейно и неявно от параметров оптимизации [3]:

$$I_t = I'_t(T) + I''_t(\pi) + I'''_t(y), \quad (1)$$

где $I'_t(T)$ – издержки, связанные с генерацией, включая расходы на топливо, и реализацией электроэнергии на временном интервале t ; $I''_t(\pi)$ – издержки, вызванные передачей электроэнергии, ее потреблением и затратами на систему управления мощностью потребителей (экономические потери от регулирования нагрузки); $I'''_t(y)$ – издержки, определяемые величиной ущерба от отклонения режимных и качественных параметров электроэнергии от своих оптимальных значений, в том числе и от недоотпуска энергии при аварийных и послеаварийных режимах работы.

Целевая функция (1) является сложной, поскольку мощности электростанций и нагрузочных узлов неявно связаны с другими переменными с помощью системы нелинейных уравнений установившихся режимов, уравнениями небаланса активной и реактивной мощностей в узлах ЭЭС, а также системой технологических и режимных ограничений. При этом независимые переменные (параметры оптимизации) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} P_i, Q_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, j \in J_{PQ}; \\ P_i, U_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, j \in J_{PU}; U_0; \\ k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T, \end{array} \right\}$$

где P_i, Q_i – активная и реактивная мощности электростанций; P_j, Q_j – активная и реактивная мощности нагрузочных узлов; U'_i, U''_i – действительная и мнимая части вектора напряжения генерирующего узла ЭЭС; U'_j, U''_j – действительная и мнимая части вектора напряжения нагрузочного узла; k'_{ij}, k''_{ij} – действительная и мнимая части комплексного коэффициента трансформации регулируемого трансформатора в ЭЭС; $\theta_i(j)$ – тангенс половинного угла вектора напряжения узла $i(j)$; P_0, U_0 – активная мощность и напряжение базисного (опорного) узла; I_{PQ}, J_{PQ} – множество генераторных и нагрузочных узлов типа P, Q ; I_{PU}, J_{PU} – множество генераторных и нагрузочных узлов типа P, U ; I_{PU}, J_{PU} – множество ветвей схемы замещения ЭЭС, отображающих регулируемые трансформаторы; θ_i, θ_j – тангенс половинного угла вектора напряжения генераторного (нагрузочного) узла. Параметры оптимизации связаны с зависимыми переменными системой нелинейных уравнений установившихся режимов и уравнением небаланса активной мощности в ЭЭС в форме $\mathbf{Y}$ или $\mathbf{Z}$, а также уравнениями баланса токов (напряжений) или мощностей в зависимости от формы отображения векторов узловых напряжений в схеме электроэнергетической системы [4].

При записи уравнений установившегося режима в Y – форме для узлов в $i \in I_{PQ}(J_{PQ})$ – виде небаланса токов в узлах ЭЭС, а для узлов $i \in I_{PU}(J_{PU})$ в виде небаланса активных мощностей в узлах, условия ограничения типа равенств в задаче комплексной оптимизации режимов можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned} & I'_{i(j)нб}(P_i, Q_i, U'_i, U''_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U'_j, U''_j, j \in J_{PQ}; \\ & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0; \\ & I''_{i(j)нб}(P_i, Q_i, U'_i, U''_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U'_j, U''_j, j \in J_{PQ}; \\ & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0; \\ & P_{i(j)нб}(P_i, Q_i, U'_i, U''_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U'_j, U''_j, j \in J_{PQ}; \\ & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0. \end{aligned}$$

Первые два уравнения составляют для узлов типа P, Q , третье – для узлов типа P, U . Для решения данной системы нелинейных уравнений установившегося режима успешно используется известный метод Ньютона-Рафсона, причем на каждой итерации вместо системы (5.2) применяется линеаризованная система уравнений относительно приращений искомых переменных $U'_i, \Delta U'_i, i \in I_{PQ}; \Delta U'_i, \Delta U''_i, j \in J_{PQ}$ и $\Delta U, i \in I_{PU}; \Delta Q_j, j \in J_{PU}$ с элементами матрицы Якоби в качестве коэффициентов левых частей уравнений и небалансами токов и активных мощностей в узлах ЭЭС в правых частях уравнений

$$\begin{aligned} & P_{0нб}(P_i, Q_i, U'_i, U''_i, i \in I_{PQ}; P_j, Q_j, U'_j, U''_j, j \in J_{PQ}; \\ & P_i, U_i, \theta_i, i \in I_{PU}; P_j, U_j, \theta_j, j \in J_{PU}; U_0, k'_{ij}, k''_{ij}, (ij) \in M_T) = 0. \end{aligned}$$

Кроме ограничений-равенств в задаче имеют место ограничения-неравенства, налагаемые на параметры оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыков А.С. Методы системного анализа: многокритериальная и нечеткая оптимизация, моделирование и экспертные оценки. – М.: Экономика, 1999. – 192 с.
2. Александров О.И., Домников С.В. Методы анализа текущих ремонтных отключений основного оборудования в сложной электроэнергетической системе. Минск: Технопринт, 2001. – 260 с.
3. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. Уч. пособие. СПб.: Изд. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
4. Секретарев Ю.А., Мятёж Т.В., Мошкин Б.Н. Оптимизация режимов работы генерирующей компании на базе ТЭЦ по выработке электроэнергии на основе критерия максимизации прибыли. Электро-механика. (Известия ВУЗов). – 2016, №4. – С. 82 – 88.

А.Н. Шумский, канд. техн. наук;
Е.В. Каптют (БГТУ, г. Минск);
С.Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук
(ВГУИТ, г. Воронеж, Россия)

УВЕЛИЧЕНИЕ АУТОНОМНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Системы управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) представляют собой ключевой элемент современных технологий, оказывающих значительное влияние на различные сферы человеческой деятельности. Вводная часть обзора посвящена рассмотрению важности и актуальности данной темы в контексте современного мира. Системы управления БЛА играют важную роль в построении системы управления полетом, которые в свою очередь применяются в множестве областей, начиная от обеспечения безопасности и эффективности военных операций и заканчивая исследованиями в области науки и коммерческим использованием. Развитие технологий управления БЛА становится неотъемлемым аспектом современного прогресса, отражающимся как на мировой арене, так и на повседневной жизни общества.

Рассмотрим основной принцип работы автономного БЛА. Такого рода БЛА обычно оснащены различными сенсорами, такими как камеры, радары, лидары и GPS, которые предоставляют информацию о окружающей среде. Эти данные используются для принятия решений в реальном времени. Полученные сенсорные данные обрабатываются с помощью вычислительных алгоритмов и методов машинного обучения для анализа ситуации и принятия решений. Этот процесс может включать методы машинного обучения, такие как нейронные сети, глубокое обучение и алгоритмы обучения с подкреплением, используются для анализа данных, выявления закономерностей и прогнозирования будущих событий на основе накопленного опыта. Кроме того, могут быть применены технологии искусственного интеллекта, такие как алгоритмы поиска, планирования и принятия решений, которые позволяют БЛА принимать адаптивные и оптимальные решения в реальном времени на основе текущего контекста и целей миссии.

Нейронные сети находят применение в настройке параметров ПИД-регулятора. Нейронная сеть способна к обучению, что позволяет использовать опыт экспертов для настройки коэффициентов. Одна из возможных структур системы автоматического регулирования крена БЛА с ПИД-регулятором и нейронной сетью в качестве блока под-

стройки представлена на рисунке 1.

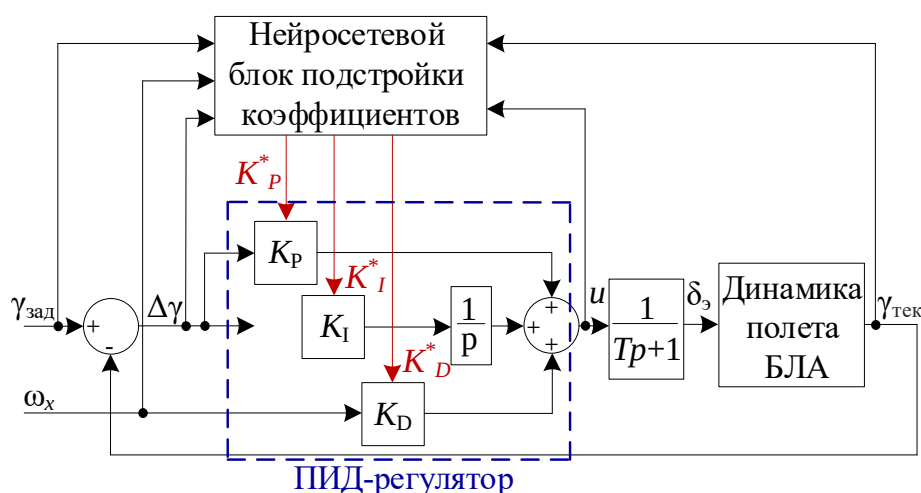


Рисунок 1 – Структура ПИД-регулятора с блоком подстройки на основе нейронной сети

На рисунке 1 нейронная сеть выполняет роль блока подстройки коэффициентов K_P , K_I , K_D для каждого набора сигналов $\gamma_{зад}$, $\omega_{\dot{\gamma}}$, u , $\gamma_{тек}$, $\Delta\gamma$. Для разработки такого рода регулятора с блоком подстройки предстоит выполнение процедуры «обучения», которая в свою очередь заключается в определении неизвестных параметров нейронов для блока подстройки.

Для выполнения процедуры обучения необходимо чтобы эксперт подстроил коэффициенты системы управления для различного заданного значения угла крена $\gamma_{зад}$. В итоге будут получены временные диаграммы по параметрам $\gamma_{зад}$, $\omega_{\dot{\gamma}}$, u^* , $\gamma_{тек}^*$, $\Delta\gamma^*$ полученные в систему управления. Данные временные диаграммы записываются в некую базы данных и предоставляются блоку подстройки. Блок подстройки, основанный на нейронной сети, настраивается таким образом, чтобы минимизировать ошибку между сигналом u^* полученным с временных диаграмм при экспериментах эксперта, и сигналом u полученным в процессе обучения блока подстройки. Таким образом, готовый блок подстройки позволит получать коэффициенты для ПИД-регулятора, который в свою очередь осуществляет процесс управления углом крена БЛА при различных входных воздействиях.

И.Ф. Кузьмицкий, канд. техн. наук;
Д.С. Карпович, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
О.А. Джумаев, проф., д-р техн. наук
(НГГТУ, г. Навои, Республика Узбекистан)

THE DEVELOPMENT OF SOME METHODS BY CONTROL OF OBJECTS WITH DELAY

In view of the development of automatic control theory and simulation of control objects, currently more and more notice is given to objects with delays. This phenomenon consists in the fact that, with the change of the input signal of control objects the output signal begins to change only after a certain period of time.

Control objects with delay are often encountered in practice when synthesizing control systems.

The most common examples of objects with delay may be the processes of drying and burning, calcination of the metal, belt conveyors, size reduction processes, and in some cases, the processes in chemical reactors.

Description of mathematical models of processes in control objects with delay execute by means of differential equations with deviating argument. The difficulties in the mathematical solution of these equations stipulate the problems of technical implementation of control systems with delays.

From the above it follows the need to compensate of delays to the application of embedding technology. One possible way of implementation is the introduction of Smith compensator in output and control channel.

However, this method may be used only where the model of control object is calculated as accurately as possible, and, most importantly, do not change over time. Unfortunately, in most production processes is observed the reverse situation (changing the raw materials, environment, etc.).

That is when the parameters of the model of control object, the values of Smith compensators for the control and output remain the same, and as a consequence, the phenomenon is not fully compensated for the delay. As a result, precipitous changes of values for the state spaces variables are exerted in terms of time point overlaps with delays.

If the control object resides at stability bounds, these changes will significantly affect descriptive adjectives of the object.

On the other hand the influence of delays takes into consideration by the expansion of delays in different series. In automatic systems most commonly used series expansion of the Pade as the most simple to implement.

In the resulting after expansion the equations for the calculation of regulators and compensators delays are receded. As a result, it becomes

possible to apply the embedding theory for the synthesis of control systems.

Due to the rapid development of microprocessor-based automation hardware to modern systems control makes more and more stringent requirements. Therefore there is a need to develop new methods of management objects with delay, taking into account the requirements imposed on the specific control systems.

Often observed in the control systems of a situation in which an object parameter with delay described by the equations for continuous systems, and regulated two-position control system. To improve the quality indicators for such systems developed mathematical tool called "hybrid dynamic systems".

In the description of modern control systems, as with delays, and without them ever more widely used the description in a state space. This presentation is most convenient to work with multi-dimensional control systems.

For transition from differential-difference equations to the model in state space we can use the structural form, called the canonical form of observability. In this case the physical meaning of the state variables of the object is conserved.

Because many of today's controllers have the ability to work in the description of the system in state space, the results of the calculation of regulators and compensators simply apply to particular processes.

Studying the issues of control of objects with delay is an important part of modern control systems. The use of modern microprocessor means allows approaching the problem of forming control actions on objects with delay from the point of view of applying increasingly complex algorithms in mathematical terms.

УДК 681.5

И.А. Хаустов, проф., д-р техн. наук
(ВГУИТ, г. Воронеж, Россия);

А.Н. Юсупбеков, д-р техн. наук
(ТГТУ, г. Ташкент, Узбекистан);

Д. С. Карпович, канд. техн. наук; Т.П. Фокин
(БГТУ, г. Минск)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППРОКСИМАЦИИ ЗВЕНА (1-W(P)) РЕАЛЬНО ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИМ ЗВЕНОМ И АПЕРИОДИЧЕСКИМ ЗВЕНОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

При управлении сложными объектами с большими запаздываниями зачастую требует реализацию функции $(1-W(p))$ для реализации предиктора или системы управления в целом. Данная функция

имеет сложности при реализации, обусловленные в том числе и большим запаздыванием функции $W(p)$.

Рассмотрим вариант, где нам необходимо получение функции $(1-W(p))$ путем аппроксимации звена запаздывания реально-дифференцирующим элементом.

Для этого исходную передаточную функцию со звеном чистого запаздывания

$$W_{зд}(p) = \frac{1 * e^{-\tau_{зд}p}}{T_{зд}^2 p^2 + 2T_{зд}\xi_{зд}p + 1},$$

где $\tau_{зд}$ – величина чистого запаздывания, $T_{зд}$ – постоянная времени исходной передаточной функции, $\xi_{зд}$ – коэффициент демпфирования, можно представить в виде последовательного соединения реального дифференцирующего звена и звена второго порядка вида:

$$1 - W_{зд}(p) \cong \frac{kp}{T_d p + 1} * \frac{1}{T_d^2 p^2 + T_1 p + 1}$$

где коэффициенты аппроксимирующей функции связаны с параметрами исходной функции следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} k &= 2T_{зд}\xi_{зд} + \tau_{зд}; \\ T_d &= \frac{0.5\tau_{зд} - \frac{T_{зд}^2}{\tau_{зд}}}{\frac{2T_{зд}\xi_{зд}}{\tau_{зд}} + 1}; \\ T_2 &= T_{зд}; \quad T_1 = 2T_{зд}\xi_{зд} \end{aligned} \quad [1]$$

Определим, какое влияние оказывает величины параметров исходного объекта на ошибку аппроксимации. Для этого произведём ряд симуляций с изменением одного параметра при неизменных иных параметрах и построим графики изменения модуля ошибки площади под кривой.

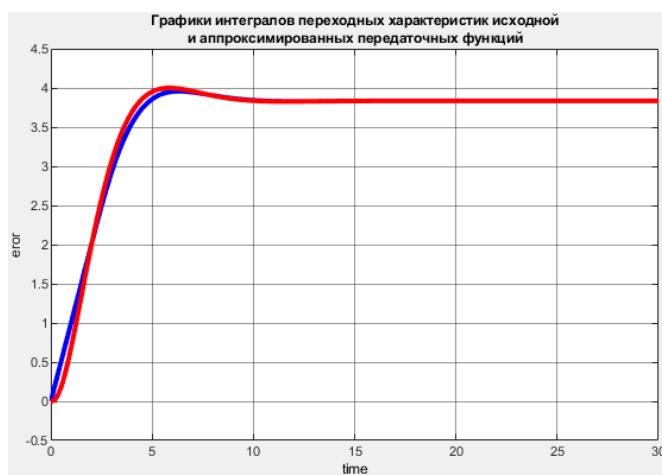


Рисунок 1 – Графики переходных характеристик исходной (синий) и аппроксимированных (красный) передаточных функций

После ряда симуляций можно получим следующую поверхность модуля ошибки аппроксимации (error) в зависимости от параметров

объекта ($\tau_{зд}$ и $T_{зд}$) (рис.2).

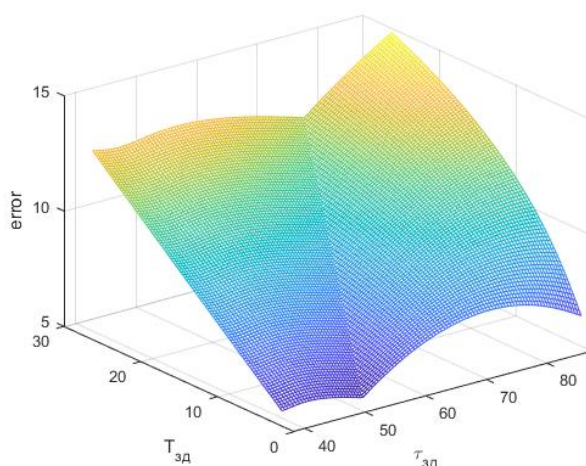


Рисунок 2 – График изменения модуля ошибки площадей под кривыми в зависимости от величины постоянной времени объекта, $T_{зд}$ и запаздывания $\tau_{зд}$

Анализ данных, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод о том, что модуль ошибки аппроксимации имеет тенденцию к снижению при уменьшении постоянной времени объекта $T_{зд}$ и запаздывания $\tau_{зд}$, однако при этом изменение является нелинейным и имеет ярко выраженный минимум, характер изменения которого является линейным. При этом условие корректной аппроксимации для минимизации ошибки может быть дополнено следующим условием:

$$T_{зд} = 1,5 + 1,125 * (\tau_{зд} - 51).$$

УДК 681.5

Д.В. Шиман, канд. техн. наук;

С.И. Карпович, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

Ё.Б. Кадиров, канд. техн. наук

(НГГТУ, г. Навои, Республика Узбекистан)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА С ИНОСТРАННЫМИ СТУДЕНТАМИ

В процессе обучения иностранных студентов очень часто во весь рост встаёт вопрос языкового барьера. Особенно актуальным такой барьер является при организации занятий со студентами негуманитарных специальностей. Наличие на слайдах презентаций на нативном для студентов языке существенно повышает вовлеченность обучающихся.

Если при этом повысить долю материала, преподаваемого на родном для студентов языке, на взгляд авторов, можно еще сильнее повысить интерес студентов к изучаемому материалу.

В настоящее время широкое распространение искусственных нейронных сетей позволяет использовать их в нескольких областях.

В первую очередь можно рассмотреть нейросети, главной функцией которых является осуществление машинного перевода.

По мнению экспертов, к лучшим нейросетям-переводчикам на данный момент можно отнести Google Translator, Яндекс переводчик, DeepL, Reverso Context, Bing Microsoft Translator, Thesaurus, Merriam-Webster. Они являются многофункциональными: знают большое количество языков, могут переводить не только слова, но и тексты (документы, изображения), способны распознавать речь, показывать примеры употребления переведенного слова в контексте (синонимы/антонимы), могут содержать грамматический и лексический комментарий, а также игры по запоминанию слов.

Также можно использовать HeyGen – нейросеть, с помощью которой можно генерировать видеоролики, озвучивать их, дублировать на разные языки и создавать виртуальных дикторов, которые зачитывают текст.

Главная особенность этой нейросети в том, что во время создания дубляжа она адаптирует движение губ человека под новую аудиодорожку и имитирует тембр голоса из оригинального ролика.

УДК 681.5.013

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;
Н.М. Олиферович, ст. преп.; Н.И. Подтероб, студ.;
П.А. Буракова, студ. (БГТУ, г. Минск)

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ НАСОСА

Насосы и насосные станции играют весомую роль в потреблении электроэнергии в водопроводных сетях и на промышленных предприятиях. Изменение режима работы насосов раньше было наиболее распространенной стратегией для достижения оптимизации потребляемой энергии. На сегодняшний день больше всего развиваются решения на основе внедрения частотно-регулируемых приводов (VFD) или в сочетании с изменением количества одновременно работающих насосов с их рациональным выбором.

В литературе можно найти возможность определения динамики контура регулирования расхода и давления [1]. Однако передаточная функция насосов почти не приводятся.

При настройке системы управления насосом или насосной станцией с помощью частотного управления руководствуются следующими формулами [2–3]:

$$F_2 = F_1 \frac{N_2}{N_1}; \quad H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2; \quad P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3.$$

где F – это расход; H – это напор; P – это мощность.

Из этих формул следует, что при стабилизации расхода в идеальных условиях мы можем получить линейную систему управления. При настройке системы стабилизации давления даже при идеальных условиях уже будет наблюдаться нелинейность в виде квадратичной зависимости коэффициента передачи в контуре стабилизации. Все это очень сильно зависит от взаимодействия характеристик насоса с характеристиками системы, на которую работает насос, а также от диапазона регулирования.

Варианты гидравлической характеристики системы могут быть разные (рис. 1–2). Производители насосов не всегда приводят характеристики для частотного регулирования, однако для практического применения можно применить принцип подобия. Обычно для других частот они параллельны номинальной.

Наложение статических напорных характеристик A и B на характеристику насоса для разных частот показывает, что здесь будет наблюдаться с нелинейности в контуре регулирования (рис. 1). Также следует обратить внимание, что узкий диапазон частот для изменения частоты. Особенно, в нашем случае для характеристики A . Коэффициент передачи объекта регулирования будет значительно больше единицы. В литературе советуют в этом случае произвести замену насоса для устойчивой работы системы или сочетать частотное регулирование расхода с дросселированием клапаном. Правда, последний вариант не очень энергоэффективен.

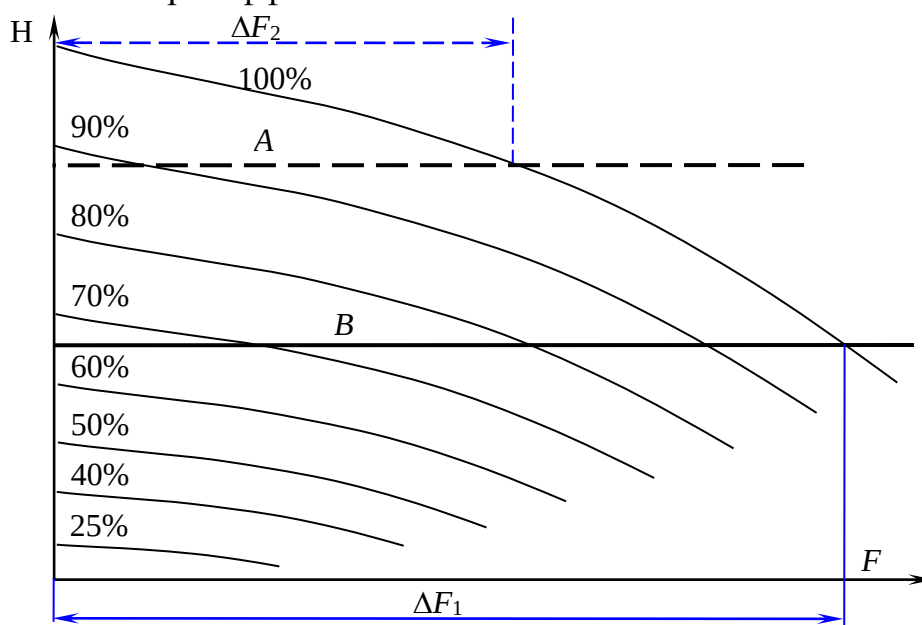


Рисунок 1 – Определения диапазона регулирования при статическом напоре для частотного регулирования

В случае зависимости сопротивления системы от расхода, чувствительность по частоте снижается. И, если для характеристики C

потенциально можно менять частоту от 100% от номинальной, то вариант *D* тоже будет иметь ограничение по частоте. Настройка регулирования напора при таких характеристиках во многом будет схожа с регулированием расхода.

Как и в предыдущем случае, коэффициент передачи объекта управления будет изменяться в зависимости от частоты, что следует учитывать при выборе настроек регулятора.

Как отмечалось выше, часто для управления насосными станциями применяются группы насосов для обеспечения энергоэффективности и чувствительности. Статические характеристики там строятся еще сложнее. При разном количестве работающих насосов и при разных подходах (один частотный преобразователь обеспечивает регулирование частоты одновременно для всей группы насосов или стабилизация параметра происходит регулированием частоты одного из насосов) чувствительность и коэффициент в контуре с обратной связью будет существенно отличаться.

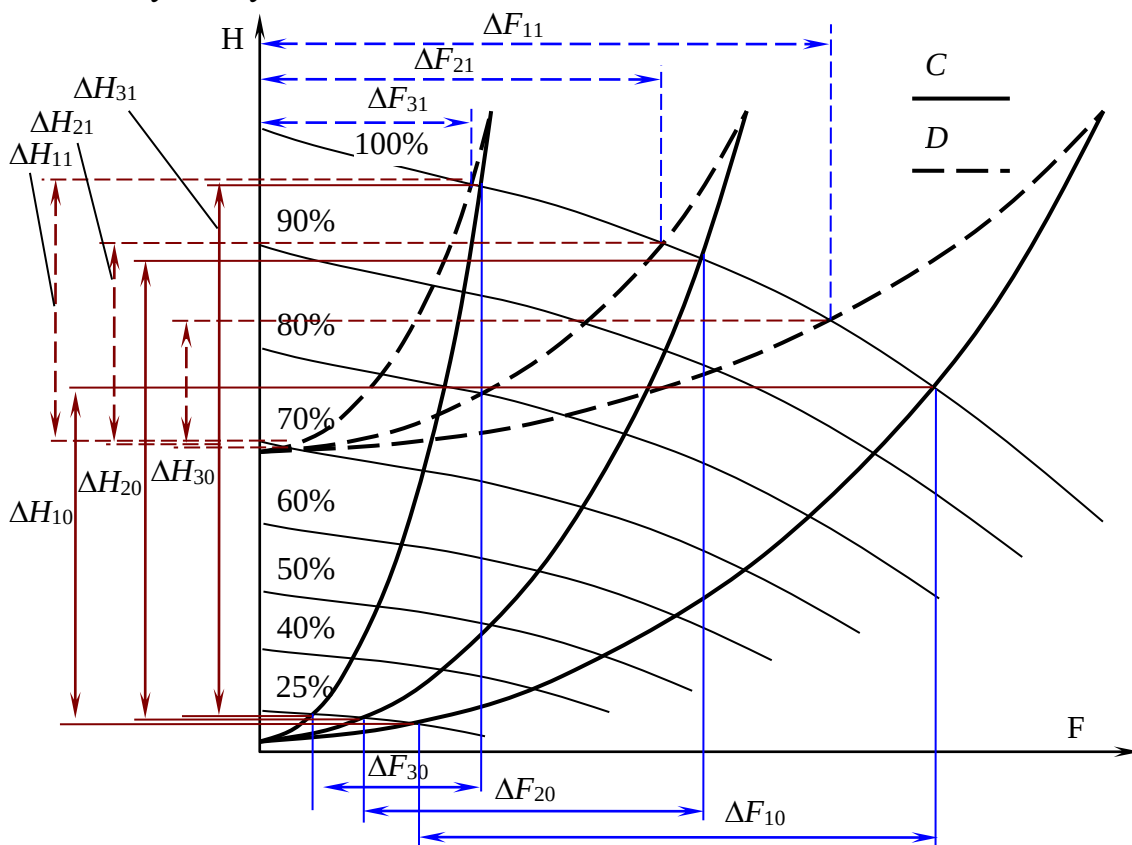


Рисунок 2 – Определения диапазона регулирования давления и расхода при зависимости напора от частоты

Регулирование температуры (например, в системах отопления) путем управления частотой насосов теплоносителей также находит применение при построении систем автоматизации. В этом случае теоретическое определение коэффициентов передачи будет выполняться еще сложнее [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Построение динамической модели гидравлического тракта / Д. А. Гринюк [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 86-й научно-техн. конф. – Минск : БГТУ, 2022. – С. 354-356.
2. Variable Speed Pumping : A Guide to Successful Applications // Elsevier Science, Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2004 – 172 p.
3. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с
4. Use of Fixed and Variable Speed Pumps in Water Distribution Networks with Different Control Strategies. Water / Briceño-León, C.X. [et al] // 2021, 13, 479. <https://doi.org/10.3390/w13040479>.

УДК 630*377.4

В.С. Исаченков, ст. преп.; Е.А. Леонов, доц., канд. техн. наук;
С.Е. Арико, доц., канд. техн. наук;
В.И. Гиль, ст. преп., канд. техн. наук; А.И. Лагун, студ. (БГТУ, г. Минск)
Д.В. Клоков, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск);
С.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (ИПК и ПК БНТУ, г. Минск);

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «КАБИНА – СИДЕНЬЕ – ОПЕРАТОР» КОЛЕСНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН

При имитационном моделировании для проектирования лесозаготовительной техники, в частности колесных трелевочных машин, большое значение имеет выбор рациональной модели системы «Кабина – сиденье – водитель». В зависимости от компоновочного решения колесной трелевочной машины модель будет иметь существенные особенности, что связано с определением динамического взаимодействия основных систем подобных машин, таких как базовая колесная машина, технологическое трелевочное оборудование и пачка древесного сырья. При этом существенное значение имеет так же выбор типа трелевочного оборудования.

Постановка задачи. Определение рациональной математической модели системы «Кабина – сиденье – оператор» с учетом особенностей колесных трелевочных машин при имитационном моделировании.

Основная часть. Для решения поставленной задачи применялись основные принципы имитационного моделирования. Рассматривались два основных варианта взаимодействия основных систем колесных трелевочных машин. В первом варианте рассматривалось влияние динамических процессов, происходящих с пачкой древесного сырья через технологическое оборудование и колесный трелевочный

трактор на оператора. Для второго варианта была определена обратная задача, а именно влияние динамических процессов, происходящих с оператором во время движения на общую динамику базовой машины.

При рассмотрении обоих вариантов взаимодействия в математических моделях оператор был представлен в виде как одномассовой, так и трехмассовой математической модели обратных маятников.

Построения предлагаемых моделей аналогичны ранее разработанным математическим моделям, где за основу принималась кабина трактора с жесткой рамой МТЗ-82.1. Такой подход предполагает нахождение независимых, изменяющихся во времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс колесной трелевочной машины при рассмотрении переходных и установившихся режимов движения, что позволяет наряду с задачами общей динамики решать круг специфических вопросов связанных с рассматриваемой проблематикой.

В проведенных теоретических исследованиях рассматривалось различное по компоновочным решениям технологическое оборудование, как в навесном, так и в прицепном варианте исполнения.

Разработка расчетных схем и соответствующих им уравнений движения колесной трелевочной машины являлась одним из основных этапов теоретических исследований ее динамики. Они отражают сложное взаимодействие подсистем самой машины (двигатель, трансмиссия, ходовая часть), технологического оборудования и предмета труда (пачки древесного сырья), а также учитывают реальные возмущающие воздействия внешнего и внутреннего характера (неровности микропрофиля дорожного полотна, крутящий момент двигателя и т. д.).

Для рассмотренных моделей характерна раздельно-агрегатная компоновка машины. Распределенные массы машины, технологического оборудования и пачка древесного сырья при этом заменены сосредоточенными, соединенными безинерционными упругодемпфирующими связями, т. е. реальная динамическая система с бесконечным числом степеней свободы заменена схемой с конечным числом степеней свободы, а все упругие звенья системы в направлении своей податливости обладают демпфирующим сопротивлением [1].

При составлении математических моделей были приняты следующие допущения: машина рассматривается как плоская симметричная система относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести; машина движется по поверхности трелевочного волокна прямолинейно без спусков и подъемов; колебания масс системы малы; упругие характеристики шин, колес и других упругих элементов, линейные или кусочно-линейные, а силы сопротивления пропорциональны скорости деформации; высоты микронеровностей дорожного

полотна под шинами колес правой и левой колеи усредняются; высокочастотные колебания элементов трансмиссии машины, технологического оборудования и кабины, как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами не рассматриваются; беговая дорожка шины колес рассматривается в виде безинерционного обруча с радиусом, равным радиусу качения; контакт шины колес с поверхностью дорожного полотна имеют постоянный без пробуксовки и бокового проскальзывания; жесткость шин колес, подвески переднего и заднего мостов, трансмиссии, кабины, сидения оператора, технологического оборудования и пачки древесного сырья является постоянной величиной; колебания в поперечной плоскости считались не связанными с продольным угловыми, так как колесная трелевочная машина симметрична относительно продольной вертикальной плоскости, проходящей через ее центр тяжести.

Основными возмущающими воздействиями внешнего и внутреннего характера, влияющими на динамику колесной трелевочной машины, рассматривались неровности дорожного полотна и крутящий момент двигателя. Возмущающие воздействия неровностей дорожного полотна представлялись в виде дискретных массивов микропрофилей, которые выражались как функция времени, с учетом запаздывания задних колес машины по отношению к передним. Крутящий момент двигателя был представлен функцией от частоты вращения коленчатого вала, а выбор его значений производился по регуляторной характеристике.

Критериями оценки воздействия возмущающих факторов на колесную трелевочную машину, которые рассматриваются в виде случайного процесса, служат соответствующие вероятностные показатели. Оценочными показателями при исследовании переходных процессов являются максимальные значения угловых, линейных отклонений дискретных масс динамической системы и их продолжительность [2].

Для первого варианта рассматриваемой задачи оператор был представлен в виде трехмассовой математической модели обратных маятников, которая включает в себя тригонометрические функции обобщенных угловых координат, которые были преобразованы в бесконечную сумму степенных функций и при аппроксимации заменены многочленами. При линеаризации полученных уравнений с разложением в ряды Тейлора с последующим отсечением всех членов многочлена выше третьего порядка. Подобные преобразования имеют смысл, когда колебания обобщенных угловых координат математической модели оператора находятся в небольших пределах [3, 4].

Рассматривался вариант упрощения трехмассовой математической модели оператора, в которой угловые колебания обобщенных координат и крутильные жесткости системы были заменены на приве-

денные горизонтальные, а вертикальные составляющие не учитывались из-за малозначительности.

Для второго варианта поставленной задачи наиболее рациональной являлась одномассовая модель оператора, аналогичная работам [5...9].

Посредством математического аппарата и на основе системы высокоуровневого программирования MATLAB R2024b были получены матрицы численных значений отклонений степеней свободы моделей, первые и вторые производные этих отклонений, соответствующие им моменты времени протекания процесса, с последующей обработкой методами математической статистики.

Результаты теоретических исследований позволили определить все необходимые параметры оценки динамической нагруженности системы «Кабина – сиденье – оператор» для колесной трелевочной машины с жесткой рамой, для различных вариантов компоновочных решений технологического оборудования как с одномассовой, так и трехмассовой моделью оператора.

Заключение. Особенностью имитационного моделирования системы «Кабина – сиденье – оператор» колесных трелевочных машин является необходимость правильного выбора математической модели оператора. Рассмотренные математические модели позволяют учитывать особенности динамического взаимодействия основных систем колесных трелевочных машин в конкретных производственных условиях для выбора наиболее рационального варианта, что может быть использовано при проектировании лесозаготовительной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, А. В. Теория лесных машин / А. В. Жуков. – Минск: БГТУ, 2001. – 640 с.
2. Силаев, А. А. Спектральная теория поддрессирования транспортных машин / А. А. Силаев. – М.: Машиностроение, 1972. – 192 с.
3. Вдовин А. Ю., Золкина Л. А., Воронцова Н. Л. Справочник по математике для бакалавров: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 80 с.
4. Математическая модель динамики тракторного поезда на базе колесного трактора класса 1.4-2.0 / Я. И. Остриков [и др.] // Труды БТИ им. С. М. Кирова. Сер. I Лесная и деревообраб. пром-сть. 1993. Вып. I. С. 56–60.
5. Исаченков В. С., Симанович В. А. Математическая модель колесной трелевочной машины // Труды БГТУ. 2011. №2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 75–81.
6. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чокерного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 39–42.

7. Исаченков В. С., Симанович В. А. Выбор типа прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2015. № 2. Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 79–83.

8. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 23–27.

9. Исаченков В. С., Арико С. Е., В. А. Симанович В. А. К вопросу выбора параметров технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. №2 (246). С. 218–223.

УДК 621.3

Р.Р. Мороз, доц., канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Все электроприёмники проектируются и изготавливаются на определенные (номинальные) параметры качества электроэнергии, и любое отклонение этих параметров от своих номинальных значений может приводить к ухудшению технико-экономических показателей функционирования электроприёмников и даже к нарушению их функционирования. Следовательно, взаимоотношения между системой электроснабжения и электрофицированным процессом с позиции качества электрической энергии необходимо регламентировать определённым документом, чтобы иметь юридические основания для разрешения проблем, которые могут возникнуть при указанных обстоятельствах (нарушениях функционирования электроприёмников).

Для унификации процесса производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии необходимо указанные свойства зафиксировать на определенных численных значениях, которые выражаются в понятии номинальных параметров качества электрической энергии.

Такой документ сформирован – это ГОСТ 32144-2013, который регламентирует допустимые отклонения показателей качества электрической энергии на суточных интервалах времени в виде интегральных значений.

При управлении режимами работы системы электроснабжения практически невозможно поддерживать параметры качества электроэнергии на уровне номинальных значений. Следует также иметь ввиду, что это поддержание обходится очень дорого.

При управлении режимами работы системы электроснабжения практически невозможно поддерживать параметры электрической энергии, которой присущи свойства, характеризующие ее качество.

Этими свойствами являются:

- величина напряжения;
- форма кривой напряжения;
- количество фаз;
- соотношение между фазами;
- частота изменения напряжения.

В основе нормирования показателей качества электроэнергии лежат следующие принципы:

- отклонение показателей качества электроэнергии от своего номинального значения рассматриваются как мешающее воздействие на функционирование электроприёмника, которое приводит к повышению затрат, связанных с преобразованием и использованием электрической энергии в технологическом процессе;
- границы возможного нахождения показателей качества электроэнергии разделены на три зоны, исходя из технико-экономических соображений.

Первая зона – нормально-допустимые отклонения показателей качества электроэнергии, при которых не наблюдается ухудшение технико-экономических показателей функционирования электроприемников или эти ухудшения незначительны. Эта зона предназначена для длительной нормальной работы.

Вторая зона – предельно-допустимые отклонения показателей качества электроэнергии, при которых наблюдаются существенные ухудшения технико-экономических показателей функционирования электроприемников. Нахождение показателей качества электроэнергии в этой зоне допускается только кратковременно.

Третья зона – выход показателей качества электроэнергии за предельно-допустимую границу при котором значительно ухудшается технико-экономические показатели функционирования электроприемников.

Показатели качества электроэнергии нормируются в течение суточного интервала времени в виде интегральных значений с заданной вероятностью для получения достоверных и сопоставимых значений.

ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ

Идея создания искусственных помощников преследовала человечество с древних времен. Мифы и легенды многих культур описывают механических существ, способных выполнять различные задачи. Однако первые серьезные попытки создания автоматизированных устройств относятся к эпохе Возрождения. Леонардо да Винчи, например, разработал проекты самоходных машин и механических рыцарей.

Рождение промышленной робототехники

– **Середина XX века:** появление первых промышленных роботов, таких как Unimate, произведенный компанией General Motors. Эти ранние роботы были громоздкими и выполняли простые повторяющиеся операции.

– **Развитие микроэлектроники:** миниатюризация электронных компонентов позволила создавать более сложные и гибкие роботы.

– **Развитие вычислительной техники:** появление мощных компьютеров сделало возможным реализацию сложных алгоритмов управления.

Современные тенденции

Современные роботы-манипуляторы стали значительно более сложными и универсальными. Они используются в различных отраслях промышленности, медицине, научных исследованиях и даже в быту.

- **Высокая точность и повторяемость:** современные роботы способны выполнять задачи с высокой точностью и повторяемостью, что особенно важно в таких областях, как микроэлектроника и фармацевтика.

- **Гибкость и адаптивность:** роботы становятся все более гибкими и адаптивными. Они могут работать в неструктурированной среде, взаимодействовать с людьми и другими роботами.

- **Искусственный интеллект:** искусственный интеллект позволяет роботам обучаться на опыте, принимать решения и адаптироваться к изменяющимся условиям.

- **Коллаборативные роботы:** коботы предназначены для совместной работы с людьми. Они безопасны, легки в программировании и могут выполнять широкий спектр задач.

Историческое развитие

1. Первые экспериментальные образцы (1950–1960-е гг.)

Зачатки промышленной робототехники появились в середине XX века, когда начались эксперименты с автоматическими манипуляторами на основе жёсткой логики и релейных схем.

Одним из первых широкоупотребимых решений стал робот **Unimate**, разработанный Дж. Ангерсом (George Devol) и Дж. Энгельбергером (Joseph Engelberger), который в 1961 г. был установлен на заводе General Motors для обслуживания литейных машин. Это устройство в основном использовало «жёсткое» управление с предварительно запрограммированными командами движения.

2. Развитие электронных систем управления (1970-е гг.)

Появление более совершенных интегральных схем и микропроцессоров в 1970-х позволило улучшить системы управления роботами.

В это время начали внедряться числовые программы (NC/Numerical Control), что позволило адаптивнее задавать движения и позиционирование звеньев.

Параллельно разрабатывались математические модели кинематики (прямая и обратная) для роботизированных рук, что заложило основы программного управления траекториями.

3. Активное внедрение роботов в промышленность (1980-е – 1990-е гг.)

Быстрое развитие производств (особенно автомобильных) привело к массовому внедрению манипуляторов. Основным типом управления – **ПИД-регуляторы** и различные модификации контуров обратной связи по положению/скорости.

Постепенно появилась необходимость учитывать **нелинейности** и динамические параметры (массы звеньев, эффекты трения и т. д.), что дало толчок к разработке **робастных** и **адаптивных** алгоритмов управления.

Параллельно стали развиваться **CAD/CAM/CAE-системы** и появились первые специализированные пакеты для симуляции робототехнических комплексов (MATLAB, Simulink, другие средства).

4. Научные прорывы и совершенствование алгоритмов (2000-е гг.)

Дальнейший рост вычислительных мощностей позволил реализовывать в реальном времени **сложные законы управления**, такие как управление по обратной динамике (computed torque control), методы Ляпунова, модельно-предиктивные (MPC) и др.

Внедрялись **сенсорные системы** (датчики силы/момента, машинное зрение), расширялись возможности роботов при обработке деталей, сборке, сварке и пр.

Возникла потребность в **интеграции** роботов в более крупные производственные цепочки и автоматизированные склады, что ускорило развитие промышленных сетей и стандартов (протоколы Profinet, EtherCAT и др.).

5. Робототехника в эпоху «Индустрии 4.0» (2010-е – по настоящее время)

Концепция «Индустрия 4.0» и киберфизические системы стимулировали переход от «жёстко» заданных программ к более **интеллектуальным и гибким** режимам работы роботов.

Начали широко применяться **искусственные нейронные сети**, методы машинного обучения и Deep Learning для задач калибровки, распознавания объектов, адаптивного управления и предиктивного обслуживания.

Получил распространение **ROS (Robot Operating System)** – открытая платформа для создания, тестирования и интеграции роботов.

Увеличилась популярность **коллаборативных роботов (cobots)**, взаимодействующих с человеком, что потребовало особых алгоритмов безопасного управления с учётом ограниченных сил и быстрого реагирования на контакты. [1, 2]

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев, Ю.Г. Автоматизированные технологии и производства. – М.: КноРус, 2017.
2. Павлов, И.Я., Якушев, В.И. Роботы: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2004.

УДК 621.01

А.Б. Чарыев, преп.; С.С. Шайымов, преп.;
И.А. Аннабердиев, преп.

(Институт Телекоммуникаций и информатики Туркменистана, г. Ашхабад,)

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОГРАММНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ -МАНИПУЛЯТОРОВ

Динамическое управление программным движением промышленных роботов-манипуляторов – это процесс разработки и реализации алгоритмов, которые позволяют роботу эффективно выполнять движения с учетом динамических характеристик, таких как ускорение, инерция, силы и моменты, действующие на систему. Такие алгоритмы обеспечивают не только точность, но и безопасность, скорость

работы и стабильность движения робота в процессе его взаимодействия с окружающей средой.

Динамическое управление особенно важно в промышленности, где роботы часто выполняют сложные задачи, требующие высокой точности и адаптивности к изменениям условий работы, например, при сварке, сборке, упаковке и манипуляциях с тяжелыми или хрупкими объектами. [1]

Основные аспекты динамического управления движением робота-манипулятора

1. Моделирование динамики манипулятора

Каждый промышленный робот имеет свою механическую структуру, включающую такие элементы, как звенья, суставы и приводы, которые имеют свои инерционные характеристики (масса, моменты инерции). Для успешного управления необходимо точно моделировать динамику этих элементов, а также взаимодействие с окружающей средой.

Математическая модель динамики робота обычно включает уравнения движения второго порядка:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = T$$

где $M(\theta)$ – матрица инерции, описывающая инерционные свойства робота, $C(\theta, \dot{\theta})$ – вектор кориолисовых сил, учитывающий центробежные и Кориолисовы силы, $G(\theta)$ – вектор гравитационных сил, T – вектор управляющих моментов, которые задаются приводами, θ – вектор углов суставов робота, $\dot{\theta}$ – вектор угловых скоростей суставов, $\ddot{\theta}$ – вектор угловых ускорений суставов.

2. Типы управляющих систем для динамического управления

Существует несколько методов и подходов к динамическому управлению движением роботов-манипуляторов.

- Простое управление на основе обратной связи (PID-регулирование): это самый базовый и распространенный метод для управления роботами. Он включает в себя пропорциональный, интегральный и дифференциальный контроль, который позволяет обеспечивать стабильность и точность в задачах, где движение относительно пространства важно, но не требует слишком сложной динамики.

- Модели на основе обратной связи с учетом инерции и ускорений: для более точного динамического управления используются модели, учитывающие инерцию и ускорения, что особенно важно для задач, в которых робот движется с высокой скоростью или взаимодействует с внешней средой. Например, при захвате объекта важно учитывать инерционные силы и моменты, чтобы избежать повреждения объекта или оборудования.

– Управление с помощью оптимизации траекторий: в этом случае оптимизируются параметры траектории (например, минимизация времени движения или максимизация точности), что важно для выполнения сложных задач, таких как сварка или точная сборка. Метод может включать оптимизацию с учетом физических ограничений, таких как максимальное ускорение, скорость и силы на суставах.

– Модели с учетом динамических ограничений: важным аспектом динамического управления является учет различных ограничений, таких как максимальное ускорение и скорость, а также ограничения на силы и моменты, которые могут действовать на суставы и приводные системы робота.

3. Методы управления динамикой манипуляторов

На практике используется несколько методов, которые делают возможным динамическое управление в реальном времени:

– Управление с учетом модели (Model-based control): этот метод основывается на точной математической модели манипулятора и предполагает вычисление требуемых управляющих воздействий на основе состояния робота (например, углов, скоростей, ускорений). Одним из методов является управление на основе модели с обратной связью (feedback linearization), которое позволяет преобразовать сложное нелинейное поведение робота в более простое для управления.

– Управление с помощью оптимизации: применение алгоритмов оптимизации для выбора управляющих усилий, учитывая как физические ограничения, так и задачи робота. Например, метод динамического программирования или методы на основе стохастических моделей (например, стохастическое управление) могут использоваться для решения задачи оптимизации траектории с учетом динамических ограничений.

– Управление с помощью искусственного интеллекта (AI): применение нейросетей, машинного обучения и других методов искусственного интеллекта для предсказания и коррекции движения робота в реальном времени. Например, алгоритмы глубокого обучения могут использоваться для обучения робота взаимодействию с объектами с учетом силы, инерции и других динамических характеристик.

4. Динамическая компенсация внешних воздействий

Важным аспектом динамического управления является компенсация внешних сил, которые могут воздействовать на манипулятор, например, силы при захвате объекта или взаимодействии с рабочей средой. Для этого могут использоваться методы обратной связи с учетом внешних сил (например, сила-сенсоры или методы импедансного управления).

Импедансное управление – это подход, при котором система управляет не только положением робота, но и его жесткостью и демпфированием, чтобы адаптироваться к изменениям внешней силы. Это особенно полезно в задачах, где робот должен работать с деформируемыми или неструктурированными объектами.

5. Использование виртуальных преград и задач с несколькими манипуляторами

В некоторых случаях роботы могут работать с несколькими манипуляторами или манипулировать объектами в тесном взаимодействии с окружающей средой. В этих случаях могут использоваться методы многоместного управления (multi-agent control), а также создание виртуальных преград, которые предотвращают столкновения с объектами или другими роботами, а также учитывают динамические изменения положения.

Применение динамического управления в промышленности

1. Роботы с высокой скоростью и точностью (например, роботизированные сварочные системы): для таких роботов важно, чтобы алгоритмы управления учитывали не только точность выполнения задачи, но и динамические особенности движения (ускорения, инерция).

2. Роботы для работы с чувствительными или хрупкими материалами: в таких приложениях используется динамическое управление с компенсацией внешних воздействий и импедансное управление для обеспечения бережного обращения с объектами.

3. Роботы для сборки или манипуляции с тяжелыми объектами: здесь динамическое управление необходимо для предотвращения перевеса или излишних усилий при манипуляции с большими или нестабильными грузами.

Заключение

Динамическое управление движением промышленных роботов-манипуляторов играет важнейшую роль в эффективной и безопасной работе роботизированных систем. Использование сложных математических моделей, современных методов оптимизации и искусственного интеллекта позволяет роботам не только точно выполнять задачи, но и адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, улучшая производительность и снижая риски. [2]

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев, Ю.Г. Автоматизированные технологии и производства. – М.: КноРус, 2017.
2. Павлов, И.Я., Якушев, В.И. Роботы: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2004.

А.А. Романцов, специалист по радиационному контролю
С.В. Лавырев; М.В. Соколов (Тамбовский завод «Комсомолец»
им. Н.С. Артемова, г. Тамбов, Россия)

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА

В современном мире неразрушающего контроля автоматизация процессов радиационного контроля сварных соединений становится все более актуальной. В этой статье будут рассмотрены возможности автоматизации таких процессов, а также текущий прогресс и нерешенные проблемы в этой области [1].

Радиационный контроль сварных швов включает в себя несколько ключевых задач [2]:

1. Выделение области прямого и эллиптического шва.
2. Определение чувствительности контроля по проволочному и канавочному эталонам.
3. Вычисление базового пространственного разрешения.
4. Автоматический поиск дефектов.

Автоматизация радиационного контроля.

Для автоматизации радиационного контроля сварных соединений используют различные системы и комплексы [3].

Система "Барс". Позволяет в автоматизированном и полуавтоматизированном режиме контролировать кольцевые сварные соединения труб разных диаметров. Принцип Работы основан на преобразовании рентгеновского излучения, прошедшего через объект контроля, в цифровое изображение [4].

Комплекс "Транскан". Предназначен для автоматизированного рентгеновского контроля кольцевых сварных соединений труб диаметром от 100 до 1420 в ходе строительства или ремонта трубопроводов. Комплекс сам перемещается вокруг трубы и позволяет измерять поперечные линейные размеры дефектов [3].

Текущие достижения и проблемы

Сегодня радиационный контроль активно развивается благодаря внедрению автоматизированных систем, цифровых детекторов и программного обеспечения для анализа данных. Однако остаются проблемы, связанные с необходимостью повышения точности измерений, скорости обработки данных и снижения эксплуатационных расходов.

Преимущества автоматизированных систем

Автоматизированные системы радиационного контроля обладают рядом значительных преимуществ [5]:

1. **Высокая скорость контроля:** Автоматизация позволяет значительно сократить время, необходимое для проведения контроля,

что повышает производительность.

2. Точность выявления дефектов: Современные системы обеспечивают высокую точность и чувствительность, что позволяет выявлять даже мельчайшие дефекты.

3. Безопасность персонала: Автоматизация снижает необходимость прямого контакта с радиоактивными источниками, что повышает безопасность труда.

4. Электронное хранение данных: Все результаты контроля сохраняются в электронном виде, что упрощает их хранение, анализ и доступ к ним.

Результаты исследований

Исследования показали, что:

- выделение области прямого и эллиптического шва, автоматическое измерение отношения сигнал/шум могут быть успешно автоматизированы;
- определение чувствительности контроля по проволочному и канавочному эталонам автоматизируется в 80% случаев;
- вычисление базового пространственного разрешения по двупроволочному эталону также поддается автоматизации.

Автоматический поиск дефектов на данный момент остается нерешенной задачей и требует участия человека.

Заключение

Полностью автоматическая расшифровка рентгеновских снимков сварных швов на данный момент невозможна, однако частичная автоматизация данного процесса может существенно повысить производительность и объективность контроля. Внедрение современных технологий и методов позволяет улучшить качество и оперативность радиационного контроля, что является важным шагом в обеспечении безопасности и надежности сварных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
2. ISO/FDIS 17636-2, Non-destructive testing of welds – Radiographic testing. Part 2: X and gamma-ray techniques with digital detectors. 2013-01-15.
3. Radiatech.ru – ООО «РаДиаТех» Радиационные диагностические технологии
4. Digital-xray.ru - «Центр Цифра» – лидер в промышленной цифровой радиографии на территории России.
5. Багаев К. А. Ещё раз об автоматической расшифровке рентгеновских снимков сварных швов // В мире неразрушающего контроля. 2015. №. 3.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ

Современное управление роботами-манипуляторами переживает период бурного развития, обусловленный стремительным прогрессом в области искусственного интеллекта, машинного обучения и сенсорных технологий. Давайте рассмотрим наиболее актуальные тенденции:

1. Искусственный интеллект и машинное обучение

Самообучение: роботы все чаще способны обучаться на основе собственного опыта, адаптируясь к новым задачам и условиям без необходимости постоянного вмешательства человека.

Глубокое обучение: нейронные сети позволяют роботам распознавать объекты, понимать естественный язык и принимать более сложные решения.

Усиленное обучение: роботы могут обучаться выполнять задачи, взаимодействуя с окружающей средой и получая обратную связь.

2. Коллаборативная робототехника (коботы)

Безопасное взаимодействие: коботы спроектированы для совместной работы с людьми, что требует высоких стандартов безопасности.

Простота программирования: многие коботы могут быть запрограммированы даже неопытными пользователями.

Гибкость: Коботы легко адаптируются к различным задачам и могут быть быстро перенастроены.

3. Виртуальная и дополненная реальность

Программирование: виртуальная реальность позволяет инженерам создавать и тестировать программы для роботов в безопасной и интуитивно понятной среде.

Обучение: дополненная реальность может использоваться для обучения операторов роботов, предоставляя им наглядные инструкции и визуализацию процессов.

4. Динамическое управление и учёт нелинейностей

Традиционные ПИД- и скалярные регуляторы дополняются более сложными методами (управление по обратной динамике, скользящий режим, нелинейная модельная регрессия). Это повышает точность и устойчивость при быстром или сложном движении.

Активно разрабатываются робастные и адаптивные алгоритмы, способные компенсировать неопределённости (трение, люфты, неточность датчиков).

5. Модельно-предиктивное управление (МРС)

Использование МРС даёт возможность прогнозировать поведение системы на несколько шагов вперёд и оптимизировать управление с учётом ограничений (приводы, моменты, безопасность).

Такие методы позволяют работать на высоких скоростях, не теряя точности, и подстраиваться к изменению нагрузок или внешних факторов.

6. Интеграция с системами машинного зрения и сенсорами

Современные роботы всё чаще используют обратную связь от машинного зрения, лазерных дальномеров, датчиков силы/момента, что усложняет контуры управления и требует адаптивных алгоритмов с элементами распознавания среды.

Решаются задачи локализации, отслеживания объектов, быстрого управления захватом (gripper control) при сборочных операциях, паллетировании и сортировке.

7. Применение методов искусственного интеллекта

Глубинное обучение (Deep Learning) используется для оптимизации траекторий, распознавания образов, интеллектуального планирования движений.

Укрепляются подходы Reinforcement Learning (обучение с подкреплением), где робот постепенно учится выбирать оптимальные действия в процессе симуляции или реальной эксплуатации.

8. Коллаборативные и гибридные системы

Внедрение коллаборативных роботов (cobots) требует новых методов безопасного управления, способных мгновенно реагировать на непредвиденный контакт с человеком или объектами.

Роботы всё активнее объединяются в мультироботные системы (рои), где управление включает распределённую координацию в реальном времени.

9. Цифровые двойники и виртуальная пусконаладка

Распространяется практика создания цифровых двойников (digital twin) роботов и производственных линий, где на стадии проектирования и отладки тестируются сценарии, проводятся виртуальные эксперименты по оптимизации управления.

Технологии виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR) помогают операторам и инженерам взаимодействовать с цифровыми моделями роботов, улучшая интерфейс управления и диагностики.

Таким образом, управление роботами-манипуляторами прошло путь от жёстко прописанных траекторий с минимальной обратной связью до полноценных динамических систем, учитывающих нелинейность, внешние возмущения и сложную сенсорную информацию. Сегодняшние тенденции нацелены на дальнейшее развитие интеллектуальных методов управления, повышение автономности, гибкости и

адаптивности роботов, что соответствует общемировому переходу к «умным» производствам и киберфизическим системам. [1], [2]

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев, Ю.Г. Автоматизированные технологии и производства. – М.: КноРус, 2017.
2. Павлов, И.Я., Якушев, В.И. Роботы: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2004.

УДК 681.51: 676.082.4

Д.А. Ковалёв, доц., канд. техн. наук,
зав. кафедрой АТПиП
(СПбГУПТД, ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

Сульфатный способ производства целлюлозы [1] характеризуется снижением потребности в топливе за счет утилизации потенциального тепла органической части черных щелоков в содорегенерационных котлоагрегатах (СРК), представляющих собой энерго-технологические установки, вырабатывающие регенерируемые химикаты и энергетическое тепло – пар (рис. 1).

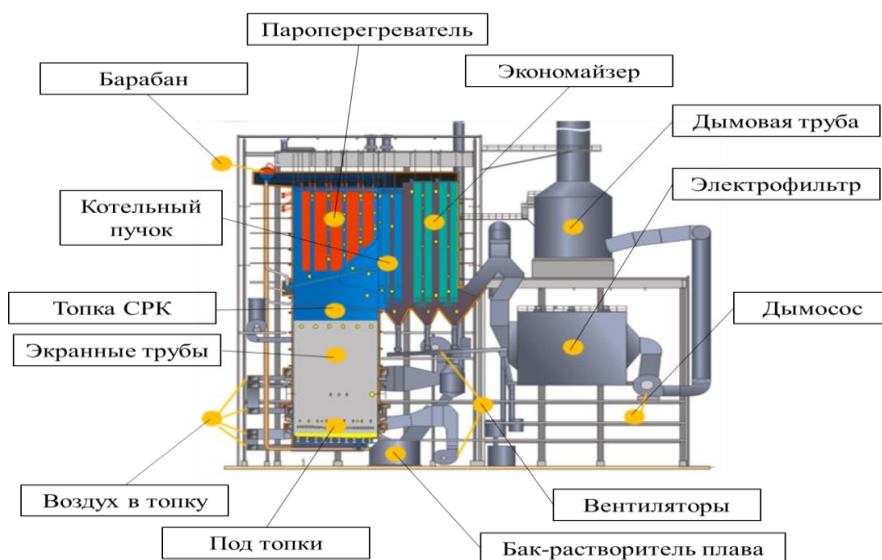


Рисунок 1 – Содорегенерационный котлоагрегат

Надежная и экономичная работа СРК определяет рентабельность производства целлюлозы. Поэтому решение вопросов, связанных с его надежной, экономичной и экологически чистой работой, является критически важной задачей.

Надежность и экономичность работы СРК в значительной степени определяется состоянием поверхностей нагрева которое зависит как от системы подготовки, так и от условий организации процесса горения.

Одним из параметров, характеризующих процесс подготовки черного щелока к сжиганию, является качество распыления черного щелока форсунками. Тонкое распыливание черного щелока приведет к тому, что капли будут быстро подсушиваться во встречном газовом потоке.

Одновременно с подсушиванием происходит пиролиз органической составляющей черного щелока, и по мере выделения летучих продуктов органический остаток щелока превращается в уголь. При этом часть его успевает сгореть в топочном объеме и тем самым вызывает изменение высоты слоя огарка. Тонкое распыливание черного щелока повышает температуру в топке, что влечет за собой максимальную производительность по пару.

Процесс горения черного щелока возможен только при наличии кислорода воздуха. Для организации процесса полного сжигания черного щелока и снижения уровня выбросов в атмосферу подачу воздуха осуществляют путем распределения его по трем ярусам по высоте топочного пространства. Изменение соотношения первичный воздух к общему вызывает изменение высоты слоя огарка.

Таким образом, на стационарность процессов, протекающих в топочном пространстве, влияет как распыливание черного щелока форсунками, так и изменение соотношения подачи воздуха.

Тонкое распыливание черного щелока повышает температуру в топке, следствием этого является увеличение скорости дымовых газов, увеличение сублимации щелочных солей и загрязнение поверхностей нагрева. Аналогичная ситуация возникает при попытках получить максимальную паропроизводительность, включая форсунки дополнительного топлива. Другим источником повышенной сублимации солей натрия и, следовательно, загрязнения поверхностей нагрева является изменение уровня огарка в топке СРК.

Экономичность работы СРК зависит от состояния поверхностей нагрева, поэтому СРК оснащается штатной системой сажеобдувки, имеющей несколько режимов эксплуатации: базовый режим; аварийный режим; останов на расшлаковку.

При базовом режиме сажеобдувки последовательность работы сажеобдувочных аппаратов строго фиксирована, и система только информирует оператора о выбранной стратегии очистки, а также о всевозможных отклонениях от заданного алгоритма управления.

При базовом режиме система очистки поверхностей нагрева диагностирует состояние сажеобдувочных аппаратов, контролируя тем

самым их работоспособность, а также время нахождения в работе, что необходимо для расчета технико-экономических показателей.

Для повышения рентабельности сажеобдувки необходимо учитывать, что очистка осуществляется вырабатываемым СРК паром.

В связи с этим осуществляется непрерывный мониторинг текущего состояния поверхностей нагрева. При этом используется ряд критериев. Простейший из них – это изменение разрежения на отдельном участке котлоагрегата.

При выборе критерия оценки останова СРК на расшлаковку используется технико-экономический критерий, учитывающий не только экономическую составляющую, но и технологию производства.

С учетом вышеприведенного разработана имитационная модель процесса сажеобдувки для предиктивной аналитики состояния поверхностей нагрева (рис. 2).

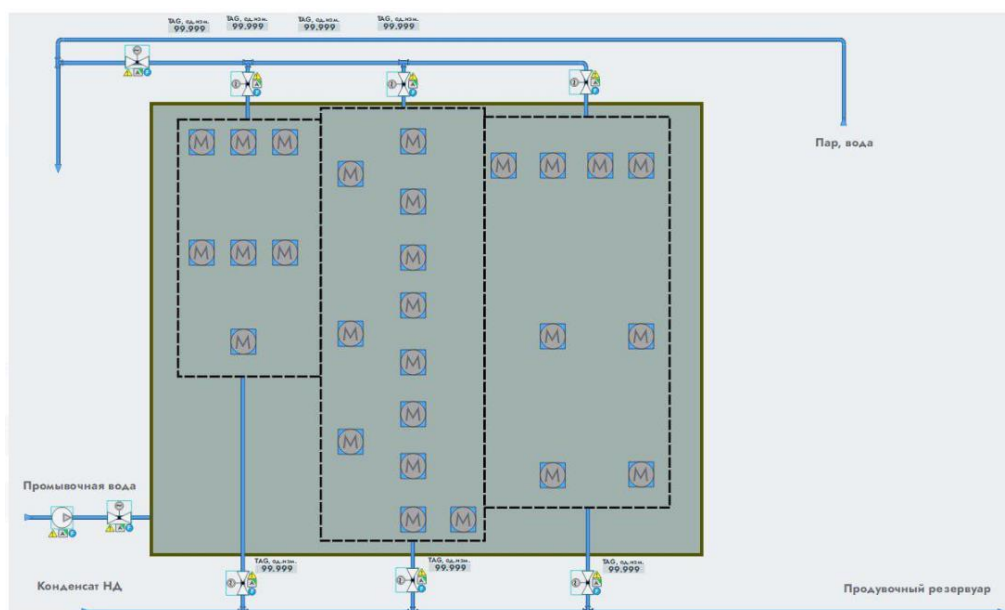


Рисунок 2 – Фрагмент имитационной модели процесса сажеобдувки

Разработанная имитационная модель процесса сажеобдувки позволяет анализировать состояния поверхностей нагрева и прогнозировать останов СРК на расшлаковку.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИТС 1-2023. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Целлюлозно-бумажное производство» (утв. Приказом Росстандарта от 26.12.2023 № 2795)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНИПУЛЯТОРОВ

Сочетание автоматизированных информационных систем (АИС) и промышленных манипуляторов открывает широкие возможности для оптимизации производственных процессов.

Процесс работы автоматизированных информационных систем с манипуляторами имеет следующие стадии:

- сбор данных: датчики, установленные на манипуляторе или в рабочей зоне, собирают информацию о положении манипулятора, состоянии обрабатываемой детали, силе воздействия и других параметрах;
- обработка данных: полученные данные передаются в АИС, где обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения;
- принятие решений: на основе обработанных данных АИС принимает решения о дальнейших действиях манипулятора, таких как изменение траектории движения, силы захвата или скорости работы;
- управление манипулятором: команды, сгенерированные АИС, передаются на исполнительные механизмы манипулятора, которые приводят их в действие. [1]

Преимущества использования АИС с манипуляторами:

- повышение точности и повторяемости операций: за счет программируемости движений манипулятора можно достичь высокой точности выполнения задач, что особенно важно при производстве изделий с малыми допусками;
- увеличение гибкости производства: быстрая перенастройка манипулятора для выполнения новых задач позволяет оперативно реагировать на изменения в производственном процессе;
- сокращение времени цикла: автоматизация рутинных операций позволяет значительно сократить время выполнения производственных задач;
- повышение безопасности труда: использование манипуляторов для выполнения опасных операций снижает риск травматизма работников;
- улучшение качества продукции: благодаря точному контролю параметров процесса можно снизить количество брака и повысить качество готовой продукции;
- оптимизация использования ресурсов: АИС позволяют оптимизировать расход материалов и энергии, снижая производственные затраты.

Области применения АИС и промышленных манипуляторов:

- сварка: роботы-манипуляторы обеспечивают высокую точность и качество сварных швов;
- сборка: автоматизированная сборка электронных компонентов, механических узлов и других изделий;
- обработка материалов: резание, шлифовка, полировка и другие виды обработки материалов;
- упаковка: упаковка готовой продукции в различные виды тары;
- лабораторные исследования: автоматизация рутинных лабораторных операций.

Примеры использования АИС с манипуляторами:

- автомобильная промышленность: сварка кузовов, покраска деталей, сборка двигателей;
- электроника: производство печатных плат, сборка электронных компонентов;
- медицина: производство медицинских изделий, проведение хирургических операций;
- пищевая промышленность: упаковка продуктов, фасовка.

Вызовы и перспективы использования АИС с манипуляторами:

- ✓ высокая стоимость внедрения: создание автоматизированных систем с использованием манипуляторов требует значительных инвестиций.
- ✓ необходимость квалифицированных специалистов: для разработки, внедрения и обслуживания таких систем требуются специалисты с высокой квалификацией.
- ✓ развитие искусственного интеллекта: внедрение искусственного интеллекта позволит создавать более гибкие и адаптивные системы, способные самостоятельно обучаться и принимать решения.

В заключение заметим, что, сочетание автоматизированных информационных систем и промышленных манипуляторов открывает новые возможности для повышения эффективности и гибкости производства. Несмотря на некоторые вызовы, эта технология имеет большой потенциал для развития и будет играть все более важную роль в промышленности будущего. [2]

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев, Ю.Г. Автоматизированные технологии и производства. – М.: КноРус, 2017.
2. Павлов, И.Я., Якушев, В.И. Роботы: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2004.

ТИПЫ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ

Выбор подходящего типа манипулятора для конкретной производственной задачи зависит от множества факторов, таких как грузоподъемность, точность, скорость, рабочая зона, тип выполняемых операций и др. Давайте рассмотрим наиболее распространенные типы манипуляторов и области их применения.

Манипуляторы классифицируются по нескольким признакам.

По конструкции:

- Декартовы: движение по трем взаимно перпендикулярным осям (X, Y, Z). Подходят для задач, требующих высокой точности позиционирования.
- Цилиндрические: сочетают вращательное движение вокруг вертикальной оси и поступательное движение вдоль этой оси. Применяются для задач, требующих большой рабочей зоны.
- Сферические: обеспечивают движение по двум вращательным осям и одной поступательной. Используются в задачах, требующих большой гибкости.
- SCARA: селективные сборочные манипуляторы с параллельными осями. Оптимальны для задач сборки и упаковки.
- Антропоморфные: имеют конструкцию, подобную человеческой руке, что обеспечивает высокую гибкость и универсальность.

Манипуляторы классифицируются по степени свободы:

- 3-осевые: ограниченные возможности движения.
- 4-осевые: более гибкие, чем 3-осевые.
- 6-осевые: максимальная гибкость, позволяют достигать любой точки в пространстве.

По приводу:

- электрические: наиболее распространены, обладают высокой точностью и гибкостью;
- пневматические: используются для выполнения простых задач с большой силой;
- гидравлические: применяются для задач, требующих большой мощности и скорости.

При выборе манипулятора необходимо учитывать следующие факторы:

- ✓ грузоподъемность: максимальный вес, который может поднять манипулятор;
- ✓ точность позиционирования: важна для задач, требующих высокой точности, например, сборки электронных компонентов;

- ✓ скорость движения: определяет производительность манипулятора;
- ✓ рабочая зона: объем пространства, в котором может перемещаться манипулятор;
- ✓ повторяемость: способность манипулятора выполнять одну и ту же операцию с одинаковой точностью;
- ✓ тип выполняемых операций: сварка, сборка, покраска, паллетирование и т. д.;
- ✓ окружающая среда: температура, влажность, наличие агрессивных сред;
- ✓ бюджет: стоимость манипулятора и его интеграции в производственный процесс.

Примеры применения

Сварка: для сварки используются преимущественно 6-осевые антропоморфные манипуляторы.

Сборка: для сборки электронных компонентов часто применяются SCARA-манипуляторы.

Обработка материалов: для резки, шлифовки и полировки используются различные типы манипуляторов в зависимости от конкретной задачи.

Упаковка: для упаковки продукции применяются декартовы и SCARA-манипуляторы.

Лабораторные исследования: для выполнения точных операций в лабораторных условиях используются манипуляторы с высокой степенью точности.

Выбор оптимального типа манипулятора для конкретной производственной задачи требует тщательного анализа всех факторов.

При выборе необходимо учитывать не только технические характеристики манипулятора, но и особенности производственного процесса, бюджет и перспективы развития производства. [1], [2]

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев, Ю.Г. Автоматизированные технологии и производства. – М.: КноРус, 2017.
2. Павлов, И.Я., Якушев, В.И. Роботы: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2004.

О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
А.В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск);
В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

БАЗОВЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПАКЕТА SL 4.7 ДЛЯ SCADA-СИСТЕМ

Система SL 4.7 (SimpLight) позволяет собирать, обрабатывать, отображать и сохранять информацию об объекте мониторинга или управления. SimpLight может являться частью АСУ ТП, системы экологического мониторинга, научного эксперимента, автоматизации здания и т. д.

Основные функции SCADA-системы SimpLight:

- сбор данных с приборов и устройств нижнего уровня: устройств ввода–вывода, PLC;
- передача управляющих сигналов – управление устройствами и агрегатами;
- логическая и математическая обработка поступивших данных;
- запись данных в базу данных (история изменений);
- отображение на экране в удобной и понятной форме всех сигналов;
- формирование отчетов по реальным и архивным данным;
- оповещение локального и удаленного персонала о нештатных ситуациях: графика и звук, e-mail, СМС, Телеграм;
- обмен данными с системами верхнего уровня (ERP, MES);
- отображение видеопотока с цифровых камер и видеорегистраторов.

Система обеспечивает полный контроль над любым технологическим объектом в реальном времени, а также позволяет провести анализ прошедших ситуаций и событий.

Возможности системы:

1) Клиент-серверная архитектура:

- сетевые клиенты (мнемосхемы, тренды, история);
- WEB-представление;
- система авторизации и прав доступа.

2) Система хранения данных:

- ✓ база данных (БД) своего формата.
- ✓ синхронизация данных в сторонние БД (MSSQL, mySQL).
- ✓ доступ к данным из скриптов.

3) Графика:

- галерея графики;

- выбор индикаторов и компонентов;
 - поддержка нескольких мониторов;
 - 4) Логика (скрипты):
 - встроенный скриптовой механизм (поддерживаются Pascal, C++);
 - математические и логические операции, условия;
 - работа с битами;
 - работа с базами данных.
 - 5) Система оповещений:
 - цветное и звуковое оповещение на мнемосхемах;
 - e-mail, СМС и Telegram оповещения;
 - журнал событий и аварий.
 - 6) Отчеты:
 - система построения отчетов – визуальный редактор отчетов.
 - экспорт в EXCEL.
 - формирование произвольных EXCEL–файлов из скрипта.
 - формирование произвольных текстовых файлов.
- Компоненты системы SimpLight:
- 1) Менеджер проектов:
 - создание и перемещение между проектами.
 - экспорт и импорт проектов.
 - создания резервных копий проектов.
 - 2) Редактор каналов:
 - настройка связи с оборудованием через MODBUS или OPC.
 - создание скриптов.
 - настройка реальных и виртуальных тегов (каналов).
 - настройка авторизации пользователей системы.
 - 3) Редактор мнемосхем:
 - создание и редактирование мнемосхем;
 - тестирование работы мнемосхем;
 - использование галерей изображений.
 - 4) Монитор:
 - опрос устройств и контроллеров;
 - отображение мнемосхемы;
 - сохранение значений в базу данных;
 - исполнение скриптов
 - регистрация аварийных событий.
 - 5) Просмотр графиков:
 - построение графиков по значениям базы данных;
 - визуальный анализ измеренных параметров;
 - экспорт данных в EXCEL.
 - 6) Отчеты:

- создание отчетов произвольной формы (.pdf, .xls);
- создание отчетов на основе текущих значений системы;
- создание отчетов на основе значений накопленных в базе данных.

7) Мобильный клиент:

- работает на iOS, Андроид;
- удаленный контроль систем автоматизации;
- графическая форма состояния объектов.

При всей простоте данный пакет имеет определенные недостатки, которые не всегда легко преодолеваются:

- ✓ отсутствие индивидуальной генерации сигнала для каждого тега;
- ✓ чрезвычайная сложность в создании «виртуального» датчика;
- ✓ отсутствие взаимосвязи между отдельными тегам в связи отсутствия аналитического модуля;
- ✓ малая база графических объектов. Желательно расширить и классифицировать графические объекты по следующим категориям: основные аппараты технологических производств, регулирующие органы (электродвигатели, гидро- и пневмоцилиндры), элементы индикации (круговые, сегментные, столбиковые, регулирующие органы (вентили, клапаны, дозаторы, насосы, компрессоры, транспортеры, шнеки, вентиляторы, заслонки, шиберы, прижимные вальцы, каландры, трубчатые электронагреватели (ТЭН), режущий инструмент);
- ✓ для полного освоения функционала и полноценного использования программы необходимо знание языков программирования (C++, Pascal).

УДК 519.2

А.В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск);
О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);
В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Амплитудные фильтры распределенных систем нашли широкое применение в сферах технического зрения (в качестве сглаживающих, выделяющих элементы структуры, фильтрующих шумы и т.д.), системах различного назначения, в которых наблюдения могут быть представлены дискретным двумерным полем (автоматика и автоматизация промышленных объектов, data mining и т.д.).

В таких распределенных системах наблюдаемое дискретное поле Y фильтруется амплитудным фильтром с ядром A нечетной

размерности. В простейшем случае размерность ядра равна (3×3) . Амплитудный фильтр для такой распределенной системы может быть описан дискретной двумерной сверткой

$$x_{s,t}^* = A^{s,t} * Y^{s,t}, \quad (1)$$

где $x_{s,t}^*$ – оценка значения элемента дискретного поля в точке (s,t) , $Y^{s,t}$ – фрагмент матрицы наблюдений с центром (s,t) , $A^{s,t}$ – ядро фильтра, в общем случае, переменное, зависящее от координат (s,t) .

Естественным для анализа качества амплитудного фильтра (1) критерием, является критерий

$$\sum_{s,t} J_{s,t} = \sum_{s,t} D[x_{s,t} - x_{s,t}^*] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $D[]$ – дисперсия, $x_{s,t}$ – истинное значение элемента дискретного поля в точке (s,t) .

Материал работы посвящен анализу критерия (2) при различных вариантах задания ядра фильтра A .

Во-первых, установлено, что кроме случаев выделения структуры, значения элементов ядра фильтра для обеспечения (2) должны зависеть от параметров шума. В простейшем случае сглаживающего фильтра эта зависимость может быть выражена через коэффициент k , т.е. $A=A(k)$. Например, для фильтра (3×3) значение элемента с координатами (s,t) равно k , а значения остальных элементов $(1-k)/8$ соответственно. При таком выборе матрицы A ее можно представить в виде

$$A(k) = B - kC, \quad (3)$$

где матрицы B и C не зависят от k и имеют конкретные числовые значения.

Используя представление (3) в (1) можем аналитически и численным моделированием исследовать зависимость k от параметров шума. В частности, для равномерного дискретного двумерного шума k является монотонно убывающей зависимостью: от 1 (шума нет) и стремящейся к $1/9$ при возрастании мощности шума.

Во-вторых, в работе анализируется влияние масштабов и качества априорной информации на критерий (2).

Такой анализ представляет интерес для задач в которых требуется идентифицировать наличие некоторой области дискретного двумерного поля в соответствии с заданным шаблоном X^u , причем размерность шаблона меньше размерности поля $|X^u| < |Y|$.

В работе показано, что оптимальным ядром фильтра в этом случае, является ядро с элементами

$$A^{s,t} = (1/9) [x_{s,t}^u / X^{u,s,t}], \quad (4)$$

где $X^{u,s,t}$ – двумерный шаблон, $x_{s,t}^u$ – значение элемента шаблонов в координатах (s,t) , в скобках обозначена операция предполагающая поэлементную операцию.

Анализ критерия (2) показывает эффективность такого выбора ядра.

Принимая во внимание, что распределение элементов ядра (4) приближенно можно охарактеризовать распределением частного двух равномерно распределенных величин на одном и то же интервале с математическим ожиданием равным единице, то условие нормировки для такого ядра также можно считать выполненным.

В-третьих, оценивая качественные параметры фильтра (1) для различного вида ошибок, можно заметить, ошибка оценки равна

$$\Delta_{s,t} = x_{s,t} - A^{s,t} * Y^{s,t} = -A^{s,t} * E^{s,t}, \quad (5)$$

где $E^{s,t}$ матрица ошибок наблюдения. Замечаем, что (5) не содержит систематическую ошибку, как например, у любого фильтра с фиксированными значениями ядра (сглаживающего, выделяющего и т.п.).

УДК 65.011

О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

А.В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

НАСТРОЙКА МОДУЛЯ «РЕДАКТОР КАНАЛОВ» ДЛЯ ПАКЕТА SL 4.7

Настройка модуля «Редактор каналов» для пакета SL4.7 начинается с добавления устройств и тегов. Тег – это канал ввода/вывода (реальный физический канал или канал виртуальный), содержащий какое-то значение в переменной канала. Вначале запускается собственно модуль «Редактор каналов». Система SimpLight работает с информацией, поставляемой каналами, перечисленными в панели «Список активных каналов».

Для того чтобы заполнить панель «Список активных каналов», необходимо обратиться к панели «Источник». Воспользуемся одним из них, а именно источником, имеющим наименование «Modbus driver». Для открытия необходимо нажать кнопку «Настройка ModBus драйвера».

В окне редактора Modbus-драйвера создается дерево узлов для чего активизируем пункт меню «Узел». На экране отобразится диалоговое окно, предлагающее выбрать тип узла. Для начала можно воспользоваться пунктом «ТСР/IP», то есть прибор будет опрашиваться по ethernet-линии.

В дереве «Modbus driver» появится пункт «Узел». Он презимовывается, для чего в правой половине окна редактируется значение свойства «Имя». После нажатия клавиши «Enter» введенное имя отобразится и в дереве «Modbus driver» в левой половине окна.

Затем указывается IP-адрес узла. Это производится в свойстве «IP адрес» (рис.1).

В дереве «Modbus driver» создается еще один пункт, а именно – добавление устройства. Для этого активизируется пункт меню «Устройство» и выбирается пункт «Создать новое устройство».

В дереве «Modbus driver» появится пункт «Устройство». Переименуем его, например, в «Пресс №1». Зададим ему адрес «2». Именно по этому адресу находится конкретное устройство, и в данном конкретном случае это «Термодат-19Е6». То есть получается в данном конкретном случае, что узел (наименование «Пресса») опрашивает устройство (наименование «Пресс №1»). Каждый пользователь сам определяет свой набор устройств и приборов.

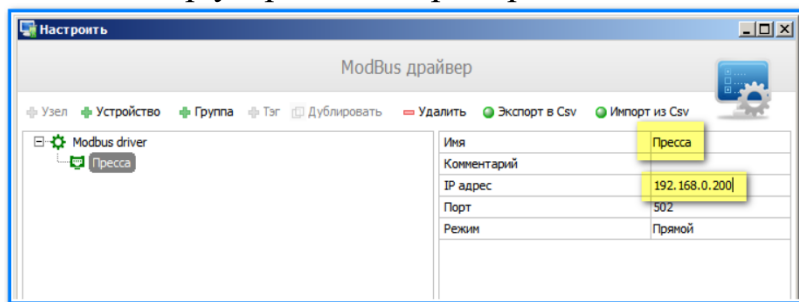


Рисунок 1 – Указания IP-адреса узла

Далее к этому устройству («Пресс №1») добавляются теги, для чего активизируется пункт меню «Тэг» (рис.2.).

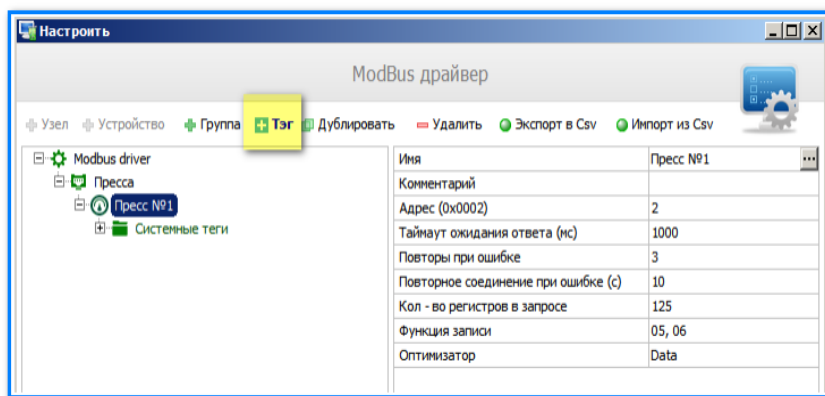


Рисунок 2 – Добавление устройству тэга

У устройства («Пресс №1») появится тег с одноименным наименованием. Изменим это имя на другое, а именно – «Температура». А также зададим тегу адрес, по которому необходимо читать информацию из устройства. В данном конкретном случае это адрес «0». Адреса регистров, читаемых в устройстве необходимо искать в документа-

ции, прилагаемой к каждому конкретному устройству.

Добавляем еще один тег. Даем ему имя «Давление» и значение адреса «3». На этом работа в редакторе «ModBus» закончена. Необходимо нажать кнопку «Ок» в нижней части окна редактора. В результате проделанных действий в дереве панели «Источник» редактора каналов мы имеем первые два тега.

Для того чтобы система могла получать информацию из этих источников, следует два этих тега перенести в панель «Список активных каналов». Это производится перетаскиванием наименования тега из панели «Источник» в панель «Список активных каналов» (рис.3.).

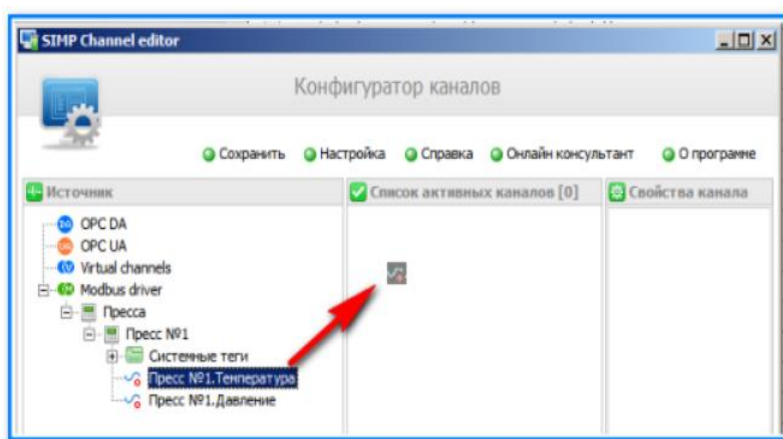


Рисунок 3 – Процесс перетаскивания тэга в список активных каналов

После этого необходимо нажать графическую иконку «Запустить тест каналов» в нижней части окна редактора каналов. На экране отобразится окно «Тест каналов», в котором должны появиться цифровые значения в колонке «Значения».

Если в окне «Тест каналов» появились цифровые значения, то все усилия по установке связи с прибором закончились успехом. В противном случае в этой колонке могут отображаться текстовые строки: «Нет связи», «Нет данных», «Обрыв датчика», «Error ...».

Правая панель редактора каналов имеет наименование «Свойства каналов». Выберем первый канал – «Температура». В правой панели «Свойства каналов» отыщем свойство «Изм. величина». Введем в поле ввода латинскую букву «С». После нажатия клавиши «Enter» введенный символ «С» преобразуется в «°С».

Повторим действия по вводу наименования единицы измерения для второго канала «Давление». Только в этот раз введем значение «кгс/см2».

Таким образом, работа в модуле «Редактор каналов» завершена. Сохранение настроек производится нажатием графической кнопки «Сохранить». Данная процедура подготавливает к созданию мнемосхемы. Для запуска модуля «Редактор мнемосхем» непосредственно из модуля «Редактор каналов» необходимо нажать графическую кнопку «Запустить редактор мнемосхем».

МОДИФИКАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ФИЛЬТРОВ ДИСКРЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ

В автоматизации производственных процессов, роботизации промышленных предприятий нередко задачи, связанные с обработкой телеметрической информации, условно статических изображений или потоковых видеоданных. Важнейшими параметрами являются скорость и качество такой обработки.

Одними из простейших по реализации и в тоже время охвату широкого спектра решаемых задач могут рассматриваться амплитудные фильтры, вычисляющие амплитудное значение (оценку) $x_{i,j}^*$ в центре некоторой дискретной области $Y^{i,j}$ в соответствии с некоторым оператором

$$x_{i,j}^* = L\{R^{i,j}\}, \quad (1)$$

где $R^{i,j} = (a_{s,t}y_{s,t})$ (2) – набор значений по всем координатам (s,t) , принадлежащим дискретной области с центром (i,j) , $y_{s,t}$ – наблюдаемые значения из области $Y^{i,j}$, $a_{s,t}$ – весовые коэффициенты.

Известным простейшим случаем (1), (2) является дискретная двумерная свертка

$$x_{i,j}^* = A^{i,j} * Y^{i,j}, \quad (3)$$

где $A^{i,j}$ – ядро фильтра, в общем случае, переменное, зависящее от координат (s,t) .

Выбор ядра фильтра определяет тот или иной его тип. Зачастую в сфере автоматизации производственных процессов имеется определенная доля априорной информации о характере телеметрической информации, параметрах обрабатываемых изображений. Поэтому представляется возможным и целесообразным ее учет через расчет весовых коэффициентов ядра фильтра.

В случае низкочастотного исходного изображения для вычисления весовых коэффициентов ядра фильтра можем воспользоваться схемой использования априорной информации, предложенной в [1]. В двумерном случае имеем следующую систему уравнений

$$(\mu_{s,t}x_{s,t}) = \text{const}_{i,j}, \quad (4)$$

где $(\mu_{s,t}x_{s,t})$ – массив значений по всем координатам (s,t) , принадлежащим дискретной области с центром (i,j) , $\mu_{s,t}$ – коэффициенты, та-

кие, что выполняется условие нормировки $\sum_{\forall s,t \in X^{i,j}} \mu_{s,t} = K_{i,j}$. Решением (4) является значения констант $const_{i,j} = K_{i,j} H(X^{i,j}) / n$, где $H(X^{i,j})$ – гармоническое среднее по области $X^{i,j}$, n – число элементов дискретной области $X^{i,j}$.

Перейдем к конкретизации (1), (2) с учетом последних решений. При выборе оператора L , как оператора среднеарифметического значения получим (3) с ядром фильтра $A^{i,j} = n^{-1} (x_{i,j} / x_{s,t})$. При этом если ошибок наблюдения нет алгоритм (3) приводит к истинным значениям. Если ошибки наблюдения присутствуют в каждой точке дискретной области $Y^{i,j}$, то получаем ошибку оценки $\Delta x_{i,j}^* = A^{i,j} * E^{i,j}$, где $E^{i,j} = \{\varepsilon_{s,t}\}$ – абсолютная ошибка наблюдения. В промежуточном случае, когда поражена только часть дискретной области наблюдений ошибка оценки $\Delta x_{i,j}^* = A^{i,j} * (mX^{i,j} + (1-m)E^{i,j})$, где m – число пораженных данных, $m \leq n$.

Еще одним вариантом (1) является медианный фильтр с априорной информацией при использовании оператора $L = median\{a_{s,t}y_{s,t}\}$, где ядро фильтра $A^{i,j} = (x_{i,j} / x_{s,t})$. Амплитудный медианный фильтр, очевидно, обладает большей устойчивостью к аномальным ошибкам наблюдения.

В работе проведено моделирование рассмотренных амплитудных фильтров, которое подтверждает результаты теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников А.В. Моделирование алгоритмов гистограммной фильтрации на пространстве дискретных состояний динамических систем [Электронный ресурс] : сборник статей / Управление информационными ресурсами // Академия управления при Президенте Республики Беларусь, редкол.: О.Н. Солдатова (общ. ред.) [и др.]. – Минск : Научное электронное издание БГУ, 2023. – Загл. с экрана, ISBN 978-985-527-663-1. С. 294-295 <https://www.pac.by/upload/medialibrary/004/Сборник%202023%20УИР.pdf>

4.5 Подсекция «ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ И БИОЭКОЛОГИЯ»

УДК 620.193.16

Ю.Г. Янута, зам. директора, канд. техн. наук
(Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск);
А.А. Шкиндерова, студ. (БГТУ, г. Минск)

ИЗУЧЕНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ АДСОРБЕНТА ОЧИСТКИ БИОГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Биогаз является перспективным возобновимым источником энергии. Согласно [1], один 1 м³ биогаза равен по энергетическому эквиваленту 0,6 м³ природного газа. В Республике Беларусь принята программа перехода на возобновляемые источники энергии, доля биогаза в генерации электроэнергии в 2023 г., согласно [2], превысила 8%. Непосредственное применение биогаза для генерации электроэнергии сдерживается, в том числе, и наличием серосодержащих соединений, количество которых может достигать 3%, а также углекислого газа. Очистка биогаза необходима для повышения его качественных характеристик с возможностью его применения в качестве возобновляемого источника энергии. Разработаны различные методы удаления таких примесей, как диоксид углерода, сероводород и влага, что позволяет повысить концентрацию метана, и соответственно калорийность. В настоящее время распространение получили следующие методы очистки:

1. Мембранное разделение. В качестве материалов используют полупроницаемые мембраны с покрытием из нанокристаллов целлюлозы/поливинилового спирта. Такие мембраны показывают высокую селективность по CO₂.

2. Химическая сорбция. В качестве поглотителей используют как воду, так и твердые сорбенты обладающие способностью связывать CO₂, H₂O и H₂S. Применение модифицированного силикагеля импрегнированного солями железа позволяет повысить концентрацию метана в биогазе с 60 % до 90 %.

3. Микроводорослево-бактериальные системы. Использование микроводорослей в системах для поглощения CO₂ и H₂S, позволяет достичь эффективности удаления H₂S до 98,9%.

4. Методы адсорбции. В качестве адсорбентов используются активированный уголь и цеолит, при этом оптимальное содержание метана достигается при определенной скорости потока и соотношении адсорбентов.

Широкое распространение получили методы очистки с исполь-

зованием хемосорбции и адсорбции. Они показали себя высокоэффективными, однако проблема, связанная с обращением с отработанными материалами не решена полностью. В работе исследована возможность регенерации отработанного хемосорбента. Внешний вид отработанного сорбента и места отбора образца для последующего анализа показаны на рис. 1. Образцы для анализа отбирали из внешнего слоя сорбента с глубиной отбора от поверхности 0-2 мм (рис. 1 образец б); средний слой – 3-4 мм (рис. 1 образец в); внутренний (центральный) слой – 8-10 мм (рис. 1 образец г).

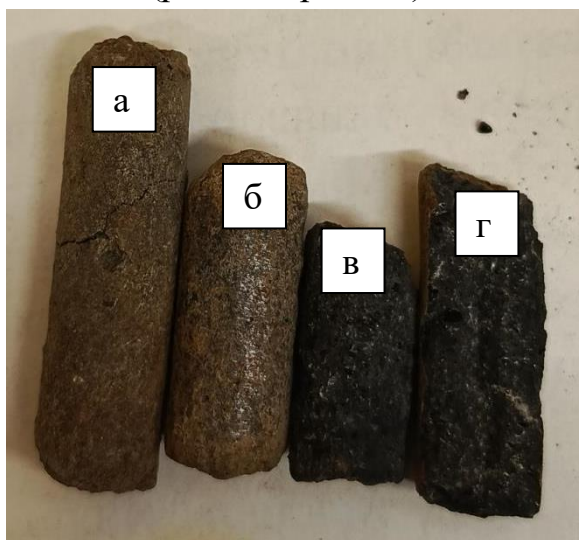


Рисунок 1 – Внешний вид (а) сорбента и сорбент после отбора пробы (б-г) образца для проведения дифференциального термического анализа

Анализ проводили с использованием дериватографа Netzsch 2500 Regulus. Масса навески составляла 15 мг. Исследование проводили с использованием платиновых тиглей в инертной и окислительной среде. Расход защитного газа составлял 30 мл/мин, газа-носителя – 20 мл/мин. Скорость нагрева 10 °С/мин. На рис. 2-4 приведены дериватограммы исследованных образцов в инертной среде (азот).

На всех кривых четко прослеживается потеря массы в диапазоне 120-140°С с максимумом около 138°С, на кривой ДТА у исследованных образцов наблюдается эндоэффект. При этом в отличие от внешнего слоя сорбента, в котором эндоэффект представлен тремя последовательными эффектами, в образцах среднего и внутреннего слоя наблюдаем лишь один минимум, что обусловлено протеканием либо схожих реакций, которые не могут быть дифференцированы при выбранных условиях опыта, либо протеканием одного процесса. С учетом того, что сорбент использован для очистки биогаза, можно заключить, что на поверхности проходит десорбция с разрушением или без не только связанных паров воды, но и других низкомолекулярных со-

единений, которые сорбируются поверхностным слоем адсорбента. Известно, что сорбенты H_2S могут связывать серу с ее окислением в элементарную. Именно выраженный эндоэффект с максимумом при $119^{\circ}C$ может быть связан с данным процессом. Подтверждением наличия фазового перехода при данной температуре является отсутствие потерь массы образца.

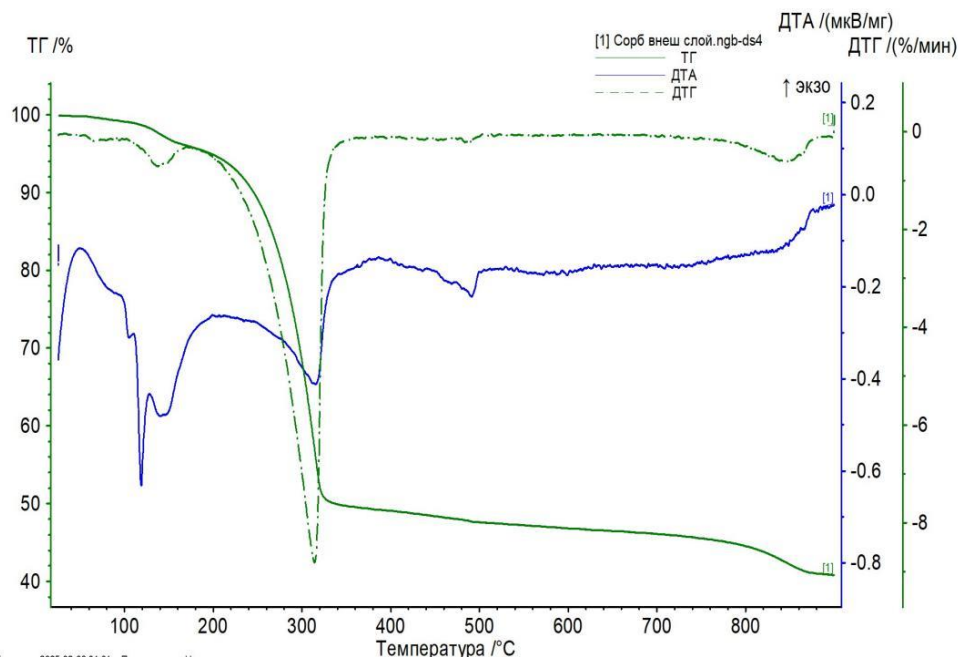


Рисунок 2 – Дериватограмма образца из поверхностного слоя сорбента (см. рис. 1б)

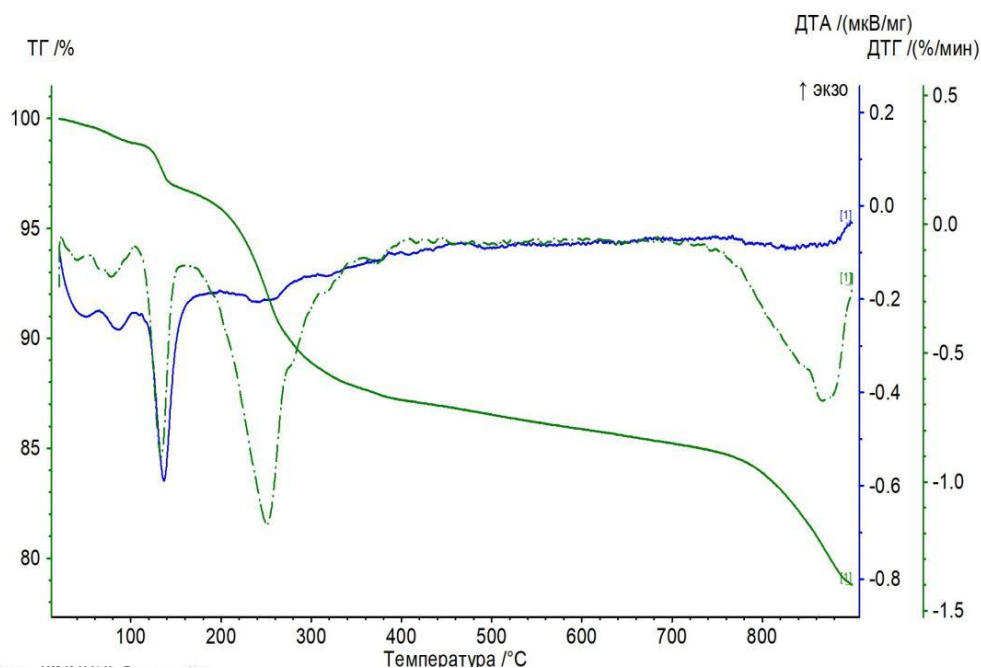


Рисунок 3 – Дериватограмма образца из срединного слоя сорбента (см. рис. 1 в)

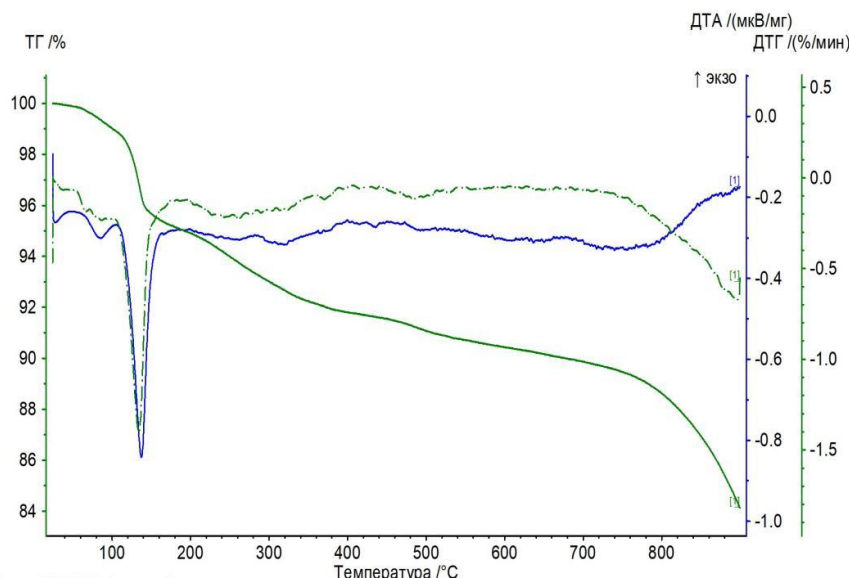


Рисунок 4 – Дериватограмма образца из срединного слоя сорбента (см. рис. 1 в)

Потеря массы образца в зависимости от состава газа-носителя представлена в таблице

Таблица – Потеря массы (%) сорбента

Диапазон температур, °С	Инертная среда			Окислительная среда		
	внешний слой	средний слой	внутренний слой	внешний слой	средний слой	внутренний слой
100-200	4,26	3,00	4,11	3,97	3,40	3,57
200-300	26,47	6,98	1,88	34,64	7,90	2,64
300-400	19,33	1,71	1,22	16,45	1,44	1,37
400-500	1,46	0,67	0,73	1,65	1,46	1,46
500-600	0,79	0,67	0,65	2,21	3,63	2,63
600-700	0,70	0,63	0,56	1,69	2,74	2,95

Установлено, что термическая обработка материала может быть использована для регенерации отработанного хемосорбента, используемого для очистки биогаза при температурах до 320°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Худык: использование энергии из биогаза наиболее благоприятно для экологии [Электронный ресурс] / Белта 1999. URL: <https://belta.by/society/view/hudyk-ispolzovanie-energii-iz-biogaza-naibolee-blagoprijatno-dlja-ekologii-512335-2022/> (дата обращения: 20.01.2025).

2. Эксперт НИЭИ Минэкономики рассказал о развитии топливно-энергетического комплекса Беларуси [Электронный ресурс] / Астровецкая праўда. 2024. URL: <https://www.ostrovets.by/news/novosti/news41545.html> (дата доступа: 20.01.2025).

Ю.Г. Янута, зам. директора, канд. техн. наук;
Е.Л. Дудникова, науч. сотр.
(Институт природопользования НАН Беларуси)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРА И ЗАРЯДА ЧАСТИЦ ГУМАТНЫХ ПРЕПАРАТОВ КАК ФАКТОР ИХ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Жидкие гуматные препараты получают из различных каустобиолитов путем перевода гуминовых веществ в водную фазу. В Беларуси основным сырьем для производства таких материалов является торф. Стимуляторы роста на основе торфа показали высокую эффективность при концентрации действующего вещества в рабочей жидкости на уровне 0,05%. Механизм их действия основан на стимулировании различных физиологических процессов в растениях, что приводит к повышению урожайности и качества продукции. В промышленных условиях производят жидкие стимуляторы роста растений с концентрацией действующего вещества до 8 масс. %, разбавление которого до рабочей концентрации производят в месте непосредственного применения. Содержащиеся в составе таких препаратов гуминовые соединения обладают высокой молекулярной массой, что при разбавлении может вызвать снижение агрегативной устойчивости вплоть до образования осадка. Использование в процессе производства физической обработки приводит к переходу в жидкий продукт агрегатов не являющихся растворимыми. Работа с высококонцентрированным гуминовым препаратом путем отделения дисперсных компонентов не позволяет достичь высоких показателей, предъявляемых к рабочим растворам применяемым при внекорневой подкормке.

Целью работы было изучить влияние размера и заряда частиц на их седиментационную устойчивость.

В качестве исходного сырья использовали верховой и низинный торф месторождения Туршевка-Чертово, характеристики которого определяли согласно [1] и представлены в таблице.

Суспензию получали путем обработки исходного сырья NaOH до pH 12, при этом гидромодуль составил 10. Материал выдерживали в течение 24 часов при перемешивании с контролем pH [2]. Крупные частицы после гидролиза удаляли фильтрованием на фильтре с размером ячейки 0,1 мм.

Таблица – Характеристики исходного торфяного сырья

Тип торфа	Зольность, %	Влажность, %	Степень разложения, %
Верховой	1,2	43,2	35
Низинный	2,2	43,2	30

Полученный материал разделяли на центрифуге Sigma 4-16 KS при температуре 20 °С в течение 10 минут при различных оборотах ротора. Фугат отделяли, определяли содержание веществ. Размер и заряд частиц определяли на анализаторе наночастиц SZ-100-Z2 Horiba. Для определения размера и заряда частиц исходный фугат разбавляли в 50 раз и определяли размер частиц при угле детектирования 173°. Усредненный размер частиц определяли как среднее значение из 12 измерений. При усреднении максимальное и минимальное из полученных значений отбрасывали. Влияние разбавления на седиментационные свойства определяли путем разбавления исходного фугата в 10, 50, 100 и 200 раз и последующим определением размера частиц.

Влияние частоты вращения ротора на содержание органических веществ в фугате представлено на рис. 1.

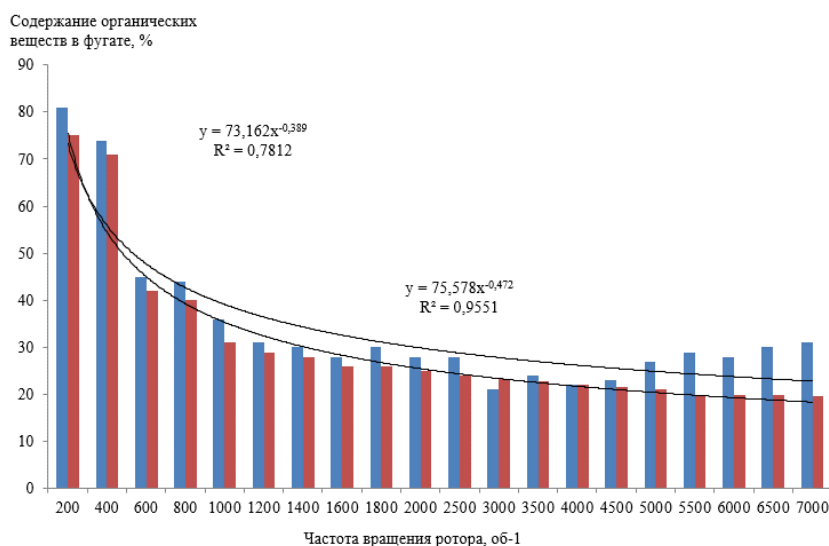


Рисунок 1 – Зависимость содержания веществ в фугате от частоты вращения ротора

Как следует из данных рис. 1, фугат верхового торфа содержит больше сухих веществ в фугате, чем фугат низинного торфа, что связано с различной плотностью частиц. Несмотря на то, что зольность исходного торфа сопоставима, зольные компоненты по-разному связаны с органической матрицей торфа. Так зола в верховом торфе, как правило практически не связана с органической компонентой. В низинном торфе минеральные компоненты связаны с функциональными группами. Это и приводит к различной плотности торфяной частицы верхового и низинного торфа.

Усреднённый размер частиц в образце при разбавлении в 50 раз представлен на рис. 2.

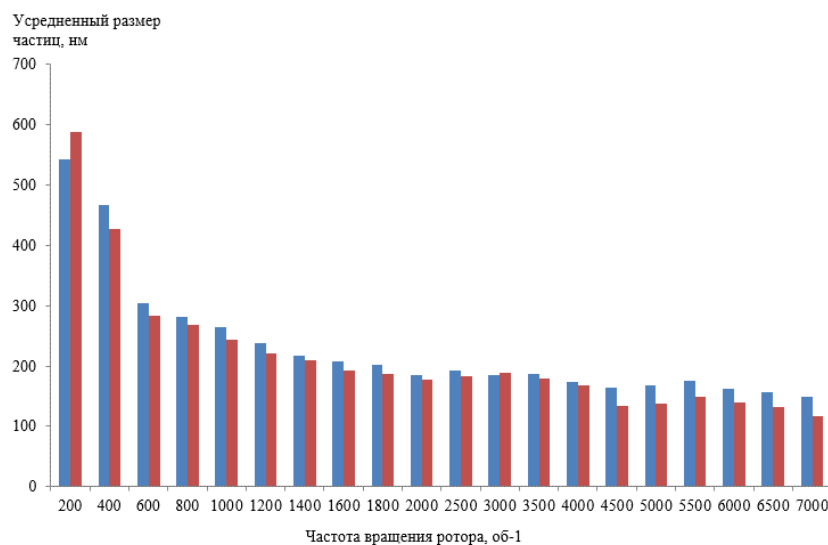


Рисунок 2 – Динамика усредненного размера частиц в фугате от частоты вращения ротора

Из полученных результатов видно, что размер частиц гидролизата верхового торфа выше по сравнению с низинным.

Изучение изменения заряда частиц в исходных образцах при их разбавлении выявило, что частицы обладают отрицательным зарядом. С увеличением разбавления, заряд частиц снижается. Это может быть связано с изменением реакции среды: в исходных образцах раствор имеет щелочную среду, но при разбавлении рН снижается. Так разбавление концентрата в 200 раз привело к снижению рН с 12 до 6,5. Такая реакция среды может приводить к самопроизвольному укрупнению частиц. На практике данному процессу содействует использование в системах опрыскивания фильтров. Размер ячеек применяемых фильтров составляет 100-200 мкм. Очистка гидролизата уже при минимальных частотах позволяет достичь такого размера частиц в фугате, но в процессе приготовления рабочего раствора и последующей фильтрации происходит укрупнение частиц. Это происходит в результате снижения заряда частиц при разбавлении раствора (рН концентрата находится на уровне 12, а рабочий раствор имеет рН около 6,5). Кроме того, при прохождении через сетчатые фильтры происходит укрупнений, а фильтр в этом случае можно рассматривать как коалесцирующее устройство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.
2. Янута Ю.Г., Алейникова В. Н. Изменение состава и свойств гуминовых веществ при их последовательном извлечении из торфа и бурого угля // Природопользование. 2022. № 2. С. 158-165.

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛЬХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
АГРЕГАТИВНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФУЛЬВОПОДОБНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ С КАТИОНАМИ КАЛЬЦИЯ**

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес к фульвокислотам (ФК), как специфическим соединениям природного происхождения. Подтверждением этому служит рост числа публикаций. ФК – это универсальные органические соединения, которые находят широкое применение в сельском хозяйстве, животноводстве и восстановлении качества окружающей среды. Их уникальные свойства улучшают усвоение питательных веществ, способствуют росту растений и помогают в детоксикации от тяжелых металлов, что делает их ценными в различных отраслях. ФК улучшают рост растений, концентрацию хлорофилла и биомассу стимулируют поглощение фосфора и развитие корней. В животноводстве ФК повышают переваримость питательных веществ и улучшают репродуктивные функции.

Несмотря на широкою распространенность в окружающей среде данных соединений, отсутствует метод эффективного и недорогого выделения таких соединений из сырья. Известен способ концентрирования ФК с использованием анионообменных материалов, но его можно рассматривать лишь как аналитический метод [1]. Одним из методов получения соединений, схожих по свойствам с ФК является метод окислительной деструкции торфяного сырья. Выделяемые таким образом органические соединения будем называть, по аналогии с ФК, фульвоподобными кислотами (ФПК). В работе такие соединения были выделены из окисленного торфяного сырья.

ФПК зарекомендовали себя как эффективные соединения, повышающие подвижность тяжелых металлов. Так в работе [2] показано, что введение ФПК в отработанную скважину по подземному выщелачиванию урана позволяет повысить его выход в раствор. Ввиду специфики применения ФПК в работе в качестве экстрагента использовали 0,1 н HCl. Динамика выхода ФПК из торфов верхового и низинного типов представлена на рисунке. Выход ФПК определяли гравиметрическим методом. После третьей последовательной экстракции последующие промывки приводили к выходу элюата с низкой оптической плотностью. В результате расчет выхода ФПК из материала рассчитывали исходя из того, что за первые три этапа обработки из об-

разца были извлечены все ФПК. Результаты извлечения ФПК из верхового торфа представлены на рис. 1.



Рисунок 1 – Выход ФПК из верхового торфа при последовательной трехкратной обработке

Результаты извлечения ФПК из низинного торфа представлены на рис. 2.



Рисунок 2 – Выход ФПК из низинного торфа при последовательной трехкратной обработке

Особенность комплексообразования ФПК с катионами заключается в отсутствии образования труднорастворимых комплексов. Данный факт не позволяет, к примеру, определить содержание функциональных групп по методу [3]. Отделение комплекса от раствора центрифугированием не позволило полностью удалить цветность в исследуемом растворе.

Целью исследований являлось установление применимости метода гельхроматографии для разделения и идентификации непрореагировавших катионов кальция от комплекса Ca-ФПК.

В качестве неподвижной фазы для разделения использовали Sephadex G50. Гель подготавливали следующим образом: навеску геля заливали раствором 0,01 н KCl в соотношении 1:10, выдерживали в течение 24 часов при периодическом перемешивании. Полученный набухший гель дегазировали, после чего переносили в колонку с

внутренним диаметром 10 мм. Гель уплотняли путем пропускания элюата (0,01 н KCl) в количестве 200 мл со скоростью 0,67 г/мин. Высота геля после уплотнения составила 46 см. Для определения внешнего объема колонки использовали Dexstran Blue с молекулярной массой 2000000 Da, общего объема – ванилин, оптическую плотность по которым определяли при длинах волн 263 и 380 нм соответственно.

Комплексы Са-ФПК готовили следующим образом: выделенные фракции образцов ФПК объединяли, высушивали при 60°C в вакуумном шкафу при разряжении 0,98 атм. до постоянной массы, после чего измельчали. В мерную колбу вместимостью 50 мл помещали навеску в количестве 0,1 г ФПК, после чего в колбу приливали 2 мл 0,1 н $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, после чего раствор в колбе доводили до метки водой и выдерживали в темном месте в течение 4 суток при периодическом перемешивании. Для анализа брали 0,4 мл раствора и вносили в колонку. После прохождения фронта жидкости на глубину 1 см от поверхности геля, над гелем формировали столб элюата высотой 8 см и подключали делительную воронку для создания постоянного давления. Отбор проб осуществляли в количестве 2,1 г. Содержание ФПК определяли по оптической плотности на спектрофотометре СФ–26 при длине волны 380 нм. Содержание Ca^{2+} определяли титриметрическим методом.

Установлено, что сравнение гелехроматограмм свободных ФПК и Са-ФПК говорит о том, что молекулярная масса комплекса увеличивается. При этом наблюдается размытие максимума с появлением двух максимумов при изучении Са-ФПК. Основное количество Ca^{2+} обнаруживали при массе элюента сопоставимых с общей массой выхода.

Таким образом показано, что применение Sephadex G 50 позволяет разделить катионы кальция связанные ФПК в Са-ФПК, и находящиеся в растворе в ионной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин В.К., Мелькановицкая С.Г., Швец В.М. Определение органических веществ в подземных водах. М.: Недра. 1976. 169 с.
2. Пантелеев В.М. Пути решения проблем добычи природного урана и геоэкологического неблагополучия регионов. Иркутск: БФ «Сосновгеология» ФГУГП «Урангеологоразведка». 2008. 184 с.
3. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника. 1975. 320 с.

СБОР НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАГНИТНЫМИ СОРБЕНТАМИ

Начиная с середины прошлого столетия, на территории Республики Беларусь осуществляется добыча и переработка нефти, в результате которой происходит загрязнение окружающей природной среды. В настоящее время Республика Беларусь не испытывает острого дефицита в воде. Однако, проблема качества поверхностных вод уже в настоящее время дает о себе знать.

Нефть, попадая в водный объект, достаточно быстро (часы и сутки) перестает существовать как исходный субстрат и подвергается фазовой дифференциации, одним из результатов которой является образование пленки. Она тонким слоем распределяется на поверхности воды, приводя к нарушению газо-, энерго-, тепло- и влагообмена между атмосферой и гидросферой [1]. Это не только негативно сказывается на органолептических, физических, химических и гидробиологических показателях качества водной среды и жизнедеятельности ее обитателей, но и способно серьезно повлиять на климат и кислородный баланс в атмосфере Земли, а значит, ухудшить состояние окружающей природной среды, и, как следствие, качество жизни человека.

Значительную экологическую опасность представляют все процессы, связанные с добычей, транспортировкой, переработкой и хранением нефти и нефтепродуктов [1]. Нефтеперерабатывающие заводы Республики Беларусь занимаются переработкой как собственных запасов нефти, так и транспортируемой из Российской Федерации с использованием системы магистральных нефтепроводов «Дружба» [2, 3]. Кроме того, ощутимый вклад в загрязнение окружающей среды вносит использование продуктов нефтепереработки (разливы топлив, смазочных материалов и др.).

Для ликвидации последствий разливов нефтепродуктов на поверхности водных сред широко используют сорбционный метод. В последнее время в качестве нефтесорбентов активно применяют магнитные сорбенты различных видов, отличающихся друг от друга способами получения и видами сырья, задействованного при производстве. Использование магнитных сорбентов при разливах нефти и нефтепродуктов, позволяет оперативно локализовать нефтяное пятно, собрать нефтепродукт и обеспечить его повторное использование.

В работе магнитный сорбент (композиционный магнитный сорбент (КМС)) был получен из отходов растительного (отход тростника) и минерального происхождения (железная окалина) в соотношении 1:1 по нескольким направлениям:

- обработка частиц угля (получены из тростника) и частиц магнетита (получены из железной окалины методом соосаждения) в водной среде ультразвуком в течении 10 мин с последующей фильтрацией и сушкой полученного сорбента. Таким образом получен КМС 1;

- смешение частиц угля с частицами магнетита в дистиллированной воде с последующей фильтрацией и сушкой полученного сорбента – КМС 2;

- смешение частиц угля с частицами магнетита в растворе этанола с последующей фильтрацией и сушкой полученного сорбента – КМС 3;

- смешение отхода тростника с частицами магнетита в дистиллированной воде с последующей фильтрацией, сушкой и прокаливанием полученного сорбента – КМС 4;

- смешение отхода тростника с частицами магнетита в растворе этанола с последующей фильтрацией, сушкой и прокаливанием полученного сорбента – КМС 5.

Для полученных материалов определили насыпную плотность, удельную поверхность и нефтеемкость. Удельную поверхность определили по катионогенному красителю фуксину.

В качестве нефтепродукта использовали печное топливо, представляющее собой продукт вторичной переработки нефти, состоящий из газойлевых фракций, в состав которых входят парафины, нафталины, циклопарафины, алкилбензолы, индены, аценафтенны, аценафтилены. Определение нефтеемкости полученных материалов проводили по следующей методике: в емкость высотой 6 см и диаметром 15 см поместили водопроводную воду, на поверхности которой разлили 0,5 г нефтепродукта. На образовавшуюся пленку распылили 0,1 г КМС. Через 15 мин с помощью магнита, помещённого в полиэтиленовый пакет, с поверхности воды собрали КМС с нефтепродуктом.

Результаты проведённых исследований представлены в таблице.

Свойства КМС, полученных в исследовании

Наименование КМС	Наименование определяемого показателя		
	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /г	Нефтеемкость, г/г
КМС 1	0,62	24,08	5,80
КМС 2	0,52	12,40	1,59
КМС 3	0,27	14,36	3,73
КМС 4	1,21	14,33	1,60
КМС 5	0,71	14,70	2,19

Из полученных результатов видно, что образец сорбента, полученного с помощью ультразвука имеет достаточно высокие показатели нефтеемкости (5,80 г/г) и удельной поверхности (24,08 м²/г).

В настоящее время наноструктурные материалы все чаще получают с помощью методов, основанных на ультразвуковых (УЗ) эффектах, возникающих в жидких средах [4]. Одним из направлений использования подобных эффектов является диспергирование наночастиц в жидкости для разрушения их агломератов. Известно, что осажденные частицы оксидов железа, обладают высокой способностью к агломерации. Использование ультразвуковой обработки позволило предотвратить данный процесс, что привело к увеличению удельной поверхности КМС 1, а также способствовало увеличению нефтеемкости.

В результате проведения исследований можно сделать выводы:

- использование УЗ обработки позволяет предотвратить агломерацию частиц магнетита, что способствует развитию удельной поверхности КМС и приводит к увеличению значений нефтеемкости;
- нефтеемкость, определенная для образцов КМС 1, достигает значений 5,80 г/г и сопоставима с нефтеемкостью природных органических материалов и некоторых композиционных материалов, предлагаемых в качестве нефтяных сорбентов [5];
- использование этанола в качестве растворителя, при обработке смеси угля и частиц магнетита позволяет существенным образом увеличить значения нефтеемкости КМС;
- наиболее перспективным сорбентом являются образцы, полученные с помощью УЗ обработки;
- наличие магнитных свойств по сравнению с обыкновенными сорбентами позволит извлекать сорбент из водных сред посредством наведения магнитного поля;
- получение магнитных нефтяных сорбентов возможно без использования дорогостоящих технологий с одновременным использованием железосодержащих отходов, что позволит снизить негативное антропогенное влияние на окружающую среду и получить экономический эффект, в результате снижения себестоимости продукции, а также снижения выплат экологического налога за счет переработки невостребованных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Караев С., Шихалиев К. Экологические проблемы транспортировки нефти и нефтепродуктов и новые методы очистки водной поверхности от нефти и нефтепродуктов. Sonderdruck aus Hannoversches Jahrbuch Band 4, 2014. 44 с.

2. «Нафтан»: хроника, события, люди [Электронный ресурс] / ОАО «Нафтан» [2025]. URL: https://www.naftan.by/img/history/naftan/Hronika_Sobytiya_Ludi_45_let.pdf (дата обращения 19.01.2025).

3. Вчера, сегодня, завтра [Электронный ресурс] / ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» [2025]. URL: <https://mnpz.by/about/vchera-segodnya-zavtra/> (дата обращения 19.01.2025).

4. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Котухов А.В. Применение ультразвуковых эффектов в жидких средах для получения наноматериалов/ Электронная обработка материалов. 2010. №3. С. 28-35.

5. Горелая О.Н., Романовский В.И., Будейко Н.Л. Магнитный сорбент из отходов водоподготовки для удаления нефтепродуктов из водных сред. Вестник ПГУ: Строительство. Прикладные науки. № 16. 2020. С. 52-56.

УДК 627.157

Е.Ю. Дорожко, магистрант
(ГУО «Университет НАН Беларуси», г. Минск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Проблема утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) становится все более актуальной в условиях современного общества, стремящегося к устойчивому развитию и охране окружающей среды.

В Республике Беларусь накопление и захоронение ТКО на полигонах приводит к значительным экологическим и экономическим последствиям. С ростом населения и уровня жизни увеличивается количество генерируемых ТКО. Эффективные методы рекультивации становятся необходимыми для управления отходами и снижения нагрузки на существующие полигоны.

Внедрение современных технологий рекультивации позволяет улучшить эффективность процессов утилизации и восстановления земель. Использование методов биоремедиации, фитоочистки и других инновационных подходов может значительно ускорить восстановление экосистемы и снизить затраты на рекультивацию.

В Беларуси функционирует около 200 полигонов для захоронения твердых коммунальных отходов. Около 60–70% из них уже исчерпали свои ресурсы и требуют рекультивации. Это означает, что

они больше не могут принимать новые отходы и нуждаются в восстановлении. Общая площадь действующих полигонов ТКО в Беларуси составляет 2,5–3 тысяч гектаров. Из них значительная часть находится в состоянии, требующем рекультивации [1].

В стране ежегодно образуется около 3 миллионов тонн ТКО, и только около 10–15% из них перерабатывается. Остальные отходы отправляются на полигоны. В ближайшие годы Беларусь столкнется с проблемой нехватки мест для захоронения отходов. Эти цифры подчеркивают необходимость разработки проектов по рекультивации отработанных полигонов, чтобы предотвратить экологические проблемы и обеспечить устойчивое управление отходами в стране [2].

Одним из решений данной проблемы может стать рекультивация отработанных полигонов с использованием донных отложений, которые представляют собой потенциальный ресурс для восстановления нарушенных земель.

Донные отложения, формирующиеся в пресных водоемах, содержат разнообразные химические вещества, которые могут быть использованы для улучшения свойств почвы и восстановления экосистем [3].

В качестве анализируемых проб донных отложений применялись отложения из следующих водных объектов – р. Лошица (г. Минск), вдхрн. Чижевское (г. Минск), р. Титовка (г. Марьина Горка), оз. Сергеевское (аг. Сергеевичи). Элементный анализ проб представлен на рис. 1.

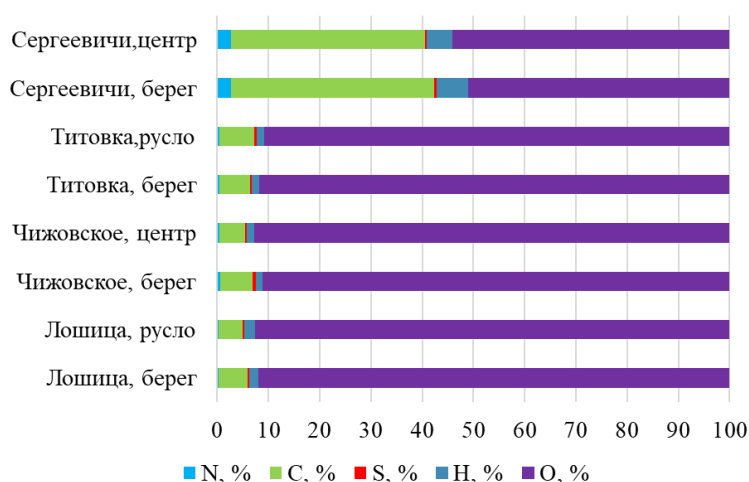


Рисунок 1 – Элементный анализ проб донных отложений

Из высушенных образцов проб готовились водные вытяжки для определения показателя фитотоксичности донных отложений, определения класса опасности отобранных проб. Полученные результаты представлены на рис. 2.

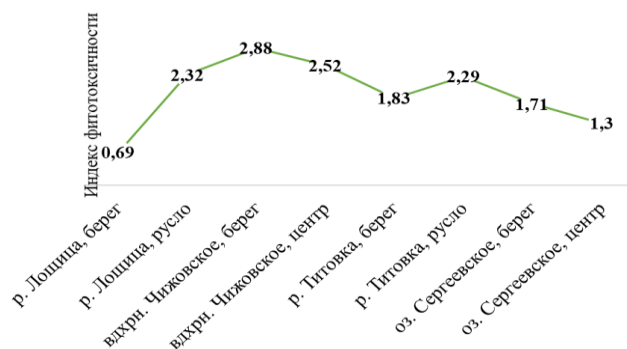


Рисунок 2 – Исследование индекса фитотоксичности проб донных отложений

Вегетационные испытания проводились с помощью семян газонной травы при соотношении 50% торф + 50 % ДО. Результаты исследований представлены на рис. 3.

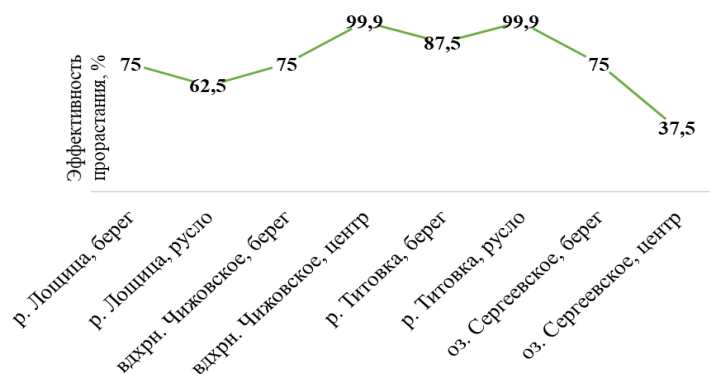


Рисунок 3 – Вегетационные испытания

Таким образом, донные отложения представляют собой перспективный материал для рекультивации отработанных полигонов ТКО.

Данное исследование направлено на выявление эффективных методов рекультивации полигонов ТКО с использованием доступных природных ресурсов, что может существенно способствовать улучшению экологической ситуации в стране и сохранению природных ресурсов для будущих поколений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>. (дата обращения: 10.01.2025).
2. Минский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minoblpriroda.gov.by>. (дата обращения: 10.01.2025).
3. Fonseca R. Reversing desertification by using dam reservoir sediments as agriculture soils / R. Fonseca, F.J.A.S. Barriga, W.S. Fyfe // Episodes. – 1998. – Vol. 4, № 21. – P. 218–224.

Д.В. Мытько, магистрант;
Л.А. Шибека, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ КАК СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

К отходам, в основной массе, относятся вещества или предметы, образующиеся в процессе осуществления экономической деятельности, жизнедеятельности человека и не имеющие определенного предназначения по месту их образования либо утратившие свои потребительские свойства [1].

Предприятия Республики Беларусь характеризуются образованием значительного количества отходов растительного происхождения. Ежегодно в Республике Беларусь образуются 4,7-5,0 млн. т отходов растительного и животного происхождения [2]. Данные отходы образуются на всех этапах заготовки, обработки и переработки растительного сырья. ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» [3], рассматриваемые отходы относит к блоку 1 «Отходы растительного и животного происхождения». Общее количество наименований отходов, относящихся к данной категории, составляет 249. Среди них выделяют отходы производства пищевых и вкусовых продуктов, производства и потребления растительных и животных жиров, масел, смазок, растительных волокон, обработки и переработки древесины, производства целлюлозы, бумаги и картона. Известно, что основным компонентом данных отходов является целлюлоза, содержание которой, в составе рассматриваемых материалов, варьируется в диапазоне 30–60 %.

В качестве объектов исследования в работе выступали целлюлозосодержащие отходы (древесные опилки, пыль зерновая, отходы тростника), образовавшиеся на промышленных предприятиях Республики Беларусь в процессе переработки различных видов растительного сырья. Древесные опилки и пыль зерновая имеют четвертый класс опасности; для отходов тростника класс опасности не установлен [3]. С учетом химического состава и степени токсичности, указанные отходы можно рассматривать в качестве потенциальных сорбционных материалов, что подтверждает анализ научно-технической литературы.

Цель работы заключалась в сравнительном анализе физико-химических характеристик целлюлозосодержащих отходов и их сорбционных свойств в отношении ионов меди.

Ситовым методом в работе проведен анализ фракционного со-

става указанных отходов. Установлено, что в составе древесных опилок и пыли зерновой преобладает фракция с размером частиц от 3,0 мм до 10 мм, массовая доля которой составляет 65% и 55% соответственно. Отход тростника предварительно подвергался измельчению. В полученном образце отхода тростника преобладает фракция с размером частиц менее 0,25 мм (на долю данной фракции приходится 75% от общей массы частиц, содержащихся в анализируемом материале). Внешний вид исследуемых целлюлозосодержащих отходов представлен на рис. 1.



Рисунок 1 – Внешний вид исследуемых целлюлозосодержащих отходов

С применением гравиметрического метода в работе определена влажность и зольность исследуемых образцов целлюлозосодержащих материалов [4]. Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица – Зольность и влажность целлюлозосодержащих отходов

Вид отхода	Влажность, %	Зольность, %
Древесные опилки	3,68	0,38
Пыль зерновая	4,84	4,00
Отходы тростника	3,15	12,79

Из представленных результатов видно, что влажность исследуемых образцов отходов при комнатных условиях варьируется в диапазоне 3-5%, что соответствует литературным данным [5] для целлюлозосодержащих материалов, находящихся в условиях естественной влажности.

Максимальное значение зольности (12,79%) имеет место для отхода тростника, минимальное (0,38%) – для древесных опилок. Следовательно, древесные опилки характеризуются максимальным содержанием органических веществ, способных разлагаться при температуре 600°C. Полученные результаты соответствуют литературным данным, поскольку известно, что для древесины зольность обычно не превышает 3% [6]. Согласно результатам исследований установлено, что отходы тростника содержат максимальное количество среди исследуемых образцов отходов минеральных примесей.

Исследование сорбционных свойств отходов проводили в статических условиях на модельных сточных водах в диапазоне начальных концентраций ионов меди от 0,1 до 1,0 г/дм³. Содержание ионов металлов в

растворе по окончанию процесса сорбционной очистки воды определяли титриметрическим методом [4]. Зная начальную и равновесную концентрацию ионов меди в воде, производили расчет сорбционной емкости образцов отходов.

Установлено, что наибольшими сорбционными свойствами в отношении ионов меди обладают древесные опилки (168,9 мг/г), наименьшими – отходы тростника (80,0 мг/г). Сорбционная емкость пыли зерновой в рассматриваемом диапазоне начальных концентраций ионов меди составляет 107,0 мг/г.

Оптимальными условиями проведения очистки сточных вод от ионов меди с использованием целлюлозосодержащих отходов являются:

- доза сорбента в растворе – 4 г/дм³;
- продолжительность взаимодействия сорбента с раствором – 60 минут.

Результаты исследований могут найти применение в практике очистки (доочистки) сточных вод от ионов меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об изменении Закона Республики Беларусь «Об обращении с отходами» // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=N12300333>. – Дата доступа: 17.01.2025.

2. Образование отходов производства // Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10301000011>. – Дата доступа: 17.01.2025.

3. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p&p1=1>. – Дата доступа: 17.01.2025.

4. Лихачева, А.В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студ. / А.В. Лихачева, Л.А. Шибека. – Минск: БГТУ, 2011. – 204 с.

5. Никифорова, Т.Е. Сольватационно-координационный механизм сорбции ионов тяжелых металлов целлюлозосодержащим сорбентом из водных сред / Т.Е. Никифорова, В.А. Козлов, Е.А. Модина // Химия растительного сырья. – 2010. – № 4. – С.23–30.

6. Демаков, Ю.П. Зольный состав древесины различных пород деревьев в пойменном биотопе / Ю. П. Демаков, С. М. Шевцов А. М. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2012. – С. 125-129.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРНИСТОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ В ПРОЦЕССАХ ВОДОПОДГОТОВКИ

В Республике Беларусь завершена детальная разведка базальтов месторождения Новодворское Пинского района, подготовлено технико-экономическое обоснование целесообразности разработки месторождения. В геологическом разрезе базальтам сопутствуют сапонисодержащие базальтовые туфы и туффиты, а также глауконитсодержащие породы, которые также будут извлекаться и накапливаться при добыче базальтового сырья [1].

По данному месторождению утверждены предварительно оцененные запасы попутных полезных ископаемых, залегающих во вскрышных породах месторождения, к которым относятся глауконитсодержащие породы (глауконитсодержащие пески, алевриты, алевролиты) в объеме 10,1 млн м³.

Ранее в Беларуси проводились исследования глауконитовых пород и концентратов с целью изучения их качественных и технологических характеристик, а также возможных областей применения в промышленном производстве и сельском хозяйстве. Так, изучалась возможность использования глауконитсодержащих пород и глауконитового концентрата месторождений «Добруш» (Гомельская область) и «Карповцы» (Гродненская область) в качестве сорбентов и ионообменников, для получения пигментов для глазурей, в производстве керамических материалов строительного назначения, масляных, клеевых и известковых красок, а также в качестве удобрения и структурирующего почву материала в растениеводстве [2].

Глауконитсодержащие породы Новодворского месторождения представляют собой глауконит-кварцевые слюдистые алевриты и алевролиты. Содержание минерала глауконита ($K(Fe^{3+}, Al, Fe^{2+}, Mg), [AlSi_3O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$) в породах варьирует в пределах 10–25 мас. %; остальные минералы представлены преимущественно кварцем, полевыми шпатами, каолинитом, мусковитом; возможно присутствие сидерита и фосфатов в небольших количествах [1].

Целью настоящей работы является изучение и оценка возможности использования вскрышных пород Новодворского месторождения средней литологической пачки, представленной глауконитсодер-

жащими кварцевыми песками, в качестве зернистой фильтрующей загрузки в процессах водоподготовки.

Зернистая фильтрующая загрузка получена путем выделения из глауконитсодержащего кварцевого песка фракции размером более 0,25 мм, содержание которой в исследуемой пробе породы составило 58–60 мас. %. Полученная фракция материала отмывалась от глинистой составляющей до прозрачности отходящей воды и высушивалась.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51641-2000 «Материалы фильтрующие зернистые» определены основные характеристики загрузки, представленные в таблице.

Таблица – Характеристики фильтрующего материала

Показатель	Значение показателя
Фракционный состав, %	
0,25–0,5 мм	90–92
0,5–1 мм	8–9
1–2 мм	0,3–0,5
>2 мм	0,1–0,2
Насыпная плотность, кг/м ³	
до уплотнения	1250±20
после уплотнения	1500±20
Плотность, кг/м ³	2700±20
Эффективная удельная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	12–33

С помощью оптического микроскопа Микромед 3 ЛЮМ проведено изучение морфологических характеристик зернистой загрузки на основе глауконитсодержащего кварцевого песка в проходящем свете при увеличении в 40 раз (рис. 1).

При анализе полученных оптических снимков установлено, что основная масса породы состоит из зерен кварца преимущественно угловатой формы с изломанной поверхностью зерен. Такая форма зерен является предпочтительной, так как при этом фильтрующая загрузка характеризуется большей межзерновой пористостью и удельной поверхностью, а соответственно и грязеёмкостью по сравнению с окатанной формой зерен.

Изучение процесса очистки воды проводилось при фильтровании через слой зернистого материала высотой 50 см. В качестве модельных сред использовались воды со взвесью каолина с концентрацией 1,0 г/дм³ и оксидатом торфа – 0,002 дм³/дм³.

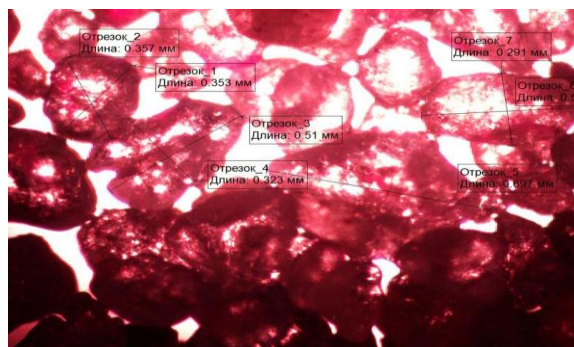


Рисунок 1 – Оптический снимок зерен фильтрующей загрузки (×40)

Для определения эффективности очистки воды проводилось сравнение оптической плотности модельных вод до очистки и проб объемом по 25 см³ после их фильтрования (рис. 2 и рис. 3). Измерение проводилось на спектрофотометре ПЭ-53600ВИ при длине волны 530 нм в кюветах с толщиной слоя 1 см. В качестве раствора сравнения использовалась дистиллированная вода.

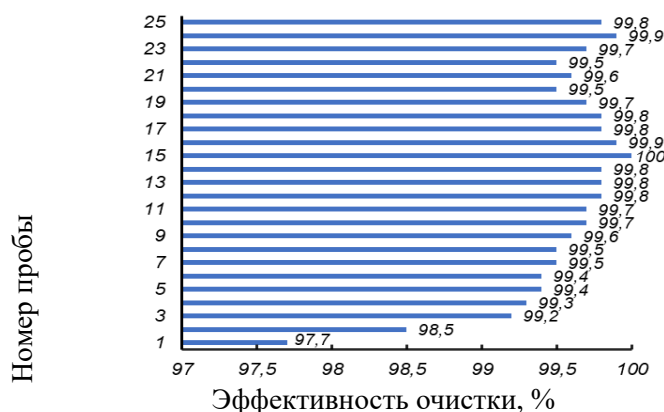


Рисунок 2 – Эффективность очистки модельной воды с каолином

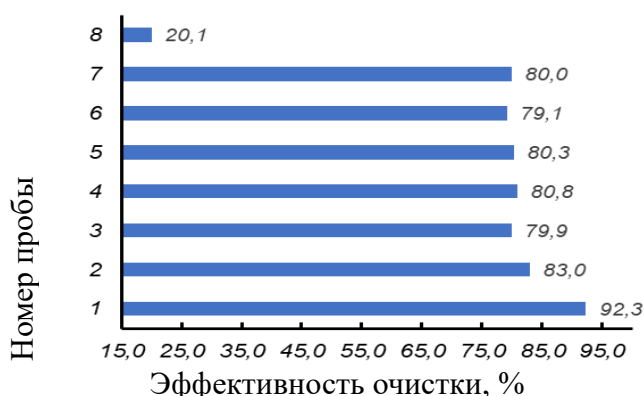


Рисунок 3 – Эффективность очистки модельной воды с оксидатом торфа

Достигаемая степень очистки воды от взвешенных частиц каолина составила от 97,7 до 100 %, причем высокая эффективность процесса (97,7 %) обеспечивалась уже при фильтрации первой порции раствора объемом 25 см³. При фильтровании модельной воды с окси-

датом торфа эффективность очистки ниже и находится в пределах 80,0–92,3 % для первых семи проб, а затем резко снижается до 20,1 %, что требует промывки фильтрующей загрузки.

Таким образом, одним из перспективных направлений использования глауконитсодержащих песков Новодворского месторождения является их применение в качестве зернистой загрузки в системах фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменкова, О. Ф. Глауконитсодержащие породы поискового участка Пинский (Беларусь) / О.Ф. Кузьменкова [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы Междунар. науч. конф., г. Минск, 31 июля – 3 августа 2017. Минск: СтройМедиаПроект, 2017. С. 172-176.

2. Кичкайло, О. В. Использование глауконитсодержащего кварцевого песка Новодворского месторождения в процессах водоочистки / О.В. Кичкайло, В. А. Янушковская, А. А. Анисько // Химическая технология и техника: материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. Минск: БГТУ, 2024. С. 432-435.

УДК 628.316.12

О.В. Кичкайло, ст. преп., канд. техн. наук;

А.В. Пожарская, студ.; Е.М. Татаринцов, студ. (БГТУ, г. Минск)

СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ГЛАУКОНИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Для очистки сточных вод большой интерес представляют природные сорбенты, к которым относится глауконит. Глауконит – трехслойный силикат непостоянного и сложного состава общей формулы: $(K, H_2O)(Fe^{3+}, Al, Fe^{2+}, Mg)_2 [Si_3AlO_{10}](OH)_2 \times nH_2O$ [1].

Данный минерал относится к слоистым алюможелезوماгниевым силикатам с пористой структурой типа 2:1 (между двумя сетками тетраэдров заключена одна сетка октаэдров). Однотипные слои разделены прослойками из катионов K^+ , воды и обменных катионов. Ионы кремния в тетраэдрах способны замещаться на ионы алюминия, что приводит к возникновению положительного заряда. Благодаря слоистой структуре глауконит обладает хорошими сорбирующими и ионообменными свойствами [2].

Глауконит выгодно отличается тем, что имеет невысокую стоимость, поддается модификации при улучшении сорбционных характе-

ристик, экологически безопасен, так как не выделяет в воду токсичных соединений.

К одному из перспективных в Республике Беларусь по мощности и концентрации основного продукта можно отнести Новодворское месторождение, расположенное в Пинском районе Брестской области.

Глауконитсодержащие породы различных месторождений характеризуются разным химическим, минералогическим составом и соответственно имеют разные сорбционные и ионообменные свойства. Недостаточная изученность сорбционных свойств природного глауконита Новодворского месторождения ограничивает возможность его применения в водоочистных системах. Возможность получения сорбента исследована для пробы глауконитсодержащей породы нижней пачки (глубина 50,6–53,7 м, мощность 3,1 м), представленной алевролитами и содержащей до 25 мас. % глауконита. В составе алевролитов доминирует кварц (39–49 мас. %) и сростки кварца со смектитами, слюдой, глауконитом, сидеритом (25–28 мас. %). Минеральные сростки имеют неправильную, редко округлую форму, зеленовато-серую окраску. Для сростков, в которых присутствует сидерит, характерна коричневато-серая окраска. Глобулы глауконита и сидерита нередко имеют черные порошковатые корки (рубашки) фосфатов, что отражено в повышенном содержании P_2O_5 (0,21–0,29 мас. %) в породах пачки. Глауконит формирует зерна и глобулы светло-зеленого цвета неправильной, реже округлой формы с матовым блеском [3].

На аппарате вибротехническом ВП-30Т проведено изучение гранулометрического состава пробы алевролита (таблица).

Таблица – Гранулометрический состав алевролита

Размер зерен, мм, и их содержание, мас. %				
<0,063	0,063–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1
8–9	22–23	55–57	11–12	1–2

Анализ данных таблицы показывает, что преобладающей фракцией породы является 0,1–0,25 мм, содержание которой составляет 55–57 мас. %.

Для получения сорбента для очистки сточных вод использовалась фракция алевролита с размером зерен менее 0,1 мм (ФГ), количество которой в породе составляет 30–32 мас. %. По данным геологов [3], основной объем глауконита сосредоточен во фракции породы менее 0,16 мм – 56–63 мас. %.

По ГОСТ Р 51641-2000 определены характеристики материала сорбента. Насыпная плотность материала ФГ до уплотнения составляет 930 ± 20 кг/м³, после уплотнения – 1190 ± 20 кг/м³. Обогащенная фракция характеризуется плотностью 2290 ± 20 кг/м³. Суммарная удельная эффективность естественных радионуклидов составляет $72,81 \pm 22,0$ Бк/кг.

Морфологические характеристики породы ФГ изучались на оптическом микроскопе Микромед 3 ЛЮМ в проходящем свете при увеличении в 40 раз (рис. 1). Поверхность зерен глауконита является сложной, слоистой и представлена чешуйками и их агрегатами различной формы с размером от 5 мкм до 200 мкм.

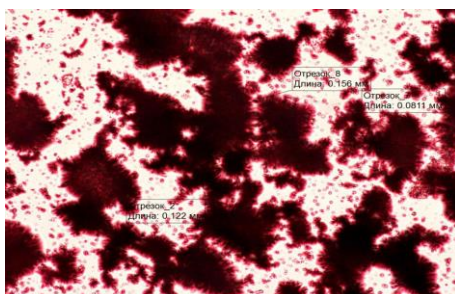


Рисунок 1 – Оптический снимок породы алевролита фракции менее 0,1 мм (×40)

Для получения гранулированного сорбента использовалась фракция алевролита ФГ. Порода смешивалась с водой до образования пластической массы с влажностью 25–28 % и путем продавливания через сито с отверстиями 2 мм гранулировалась. Высушенные гранулы обжигались в электропечи при температурах 450 °С и 600 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч.

Установлено, что значение полной статистической обменной емкости в диапазоне концентрация 0,3–3,0 г/дм³ составляют 81–86 мг/г по ионам Ni⁺ и 118–122 мг/г по ионам Cu²⁺. В работе определено оптимальное время сорбции, которое составляет 2 часа.

Таким образом, сорбенты на основе глауконитсодержащей породы можно рекомендовать к использованию в качестве сорбента ионов никеля и меди, в частности для очистки сточных вод гальванического производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева, И. В. Минералы группы глауконита и эволюция их химического состава / И. В. Николаева // Проблемы общей и региональной геологии. Новосибирск. 1971. С. 320-336.
2. Адсорбционная способность глауконита Бондарского района Тамбовской области / В. В. Вигдорович [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. №. 1. С. 121-126.
3. Кузьменкова, О. Ф. Глауконитсодержащие породы поискового участка Пинский (Беларусь) / О.Ф. Кузьменкова [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы Междунар. науч. конф., посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко, г. Минск, 31 июля – 3 августа 2017 г. – Минск: СтройМедиаПроект, 2017. С. 172-176.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫМЫВАНИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время при производстве силикатных строительных материалов часто предлагается использовать различные отходы: сталеплавильные шлаки, отходы формовочных смесей, золы ТЭЦ, осадок сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности (скоп), отходы гальванического производства и т.п. [1–3]. При этом основное внимание уделяется определению физико-механических свойств полученных материалов: плотности, прочности при сжатии и изгибе, водопоглощению, морозостойкости и др. В значительно меньшей степени внимание уделяется экологической безопасности материалов, полученных с использованием отходов производства. Между тем отходы часто содержат весьма опасные элементы, попадание которых в окружающую среду может причинить ей существенный вред.

В работе исследовалась экологическая безопасность образцов керамического кирпича, полученного с использованием осадка очистных сооружений гальванического производства (ООСГП).

Сырьевыми компонентами для получения опытных образцов являлись глина месторождения Гайдуковка и ООСГП одного из белорусских предприятий в количестве от 5 до 40 масс.%, элементный состав которого приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав ООСГП, масс.%

С	О	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ni	Fe	Zn
18,13	25,40	0,87	0,92	0,14	3,08	0,13	5,12	3,51	38,2	4,42

Единственным тяжелым металлом, который входит в состав глины, является железо. В состав исследуемого отхода кроме соединений железа также входят соединения таких тяжёлых металлов, как цинк и никель, которые представляют опасность для окружающей среды и здоровья человека. Поэтому при проведении санитарно-гигиенической оценки образцов керамического кирпича, содержащих данный вид отхода, были проведены исследования, направленные на обнаружение и количественное определение соединений цинка, никеля и железа, выделяющихся из них в объекты окружающей среды.

Миграция химических веществ из керамического кирпича в воздух ничтожно мала. Поэтому проводились исследования миграции

химических веществ в водную среду с $\text{pH}=7$ и $\text{pH}=4,8$. Последняя имитирует кислотные дожди, выпадение которых возможно на территории Республики Беларусь. Исследования проводились в соответствии с методическими указаниями МУ 2.1.674-97 «Санитарно-гигиеническая оценка стройматериалов с добавлением промотходов», утверждёнными Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 08.08.1997. Отбор проб осуществлялся через 1, 3, 7, 10, 20 и 30 суток.

В растворах, полученных при экстрагировании тяжелых металлов из образцов керамического кирпича, полученных без добавления ООСГП, ионы Zn (II) и Ni (II) не обнаружены, что связано с их отсутствием в составе используемой глины. Ионы железа в этих растворах присутствуют в небольших количествах (от 0,05 до 0,091 мг/л при $\text{pH}=4,8$ и от 0,02 до 0,054 мг/л при $\text{pH}=7$).

Миграция Zn (II) и $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ увеличивается с повышением содержания осадка очистных сооружений гальванического производства в образцах, а также при увеличении кислотности раствора экстрагирования. При этом наиболее интенсивно миграция происходит в первые 20 суток, после чего концентрация ионов тяжелых металлов в экстракте меняется незначительно. Это может быть связано с тем, что за первые 20 суток из образцов вымываются подвижные формы металлов, после чего их миграция замедляется. Ионы никеля в экстрактах обнаружены не были.

Концентрация ионов Zn (II) во всех случаях существенно ниже ПДК в питьевой воде. Содержание железа ($\text{Fe}_{\text{общ.}}$) значительно превышает ПДК в питьевой воде, что, по-видимому, связано с высоким содержанием железа в отходе – около 40 масс. %.

Вследствие длительного времени эксплуатации керамического кирпича, которое составляет десятки и даже сотни лет, для определения его экологической безопасности необходимо изучение миграции ионов тяжёлых металлов в течение длительного времени. Для эксперимента 25 лет тому назад были изготовлены образцы керамического кирпича с использованием осадка очистных сооружений гальванического производства. Количество отхода, вводимого в керамическую массу, составляло 5 и 10 масс. % по сухому веществу,

Полученные образцы для изучения миграции ионов тяжелых металлов были помещены в кислую среду с $\text{pH } 3,5$ и $5,5$. Соотношение твердой и жидкой фаз 1:10. По прошествии 25 лет из растворов отбирали пробы для определения в них концентрации ионов цинка, никеля и железа, входящих в состав осадка очистных сооружений гальвани-

ческого производства. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Из экспериментальных данных следует, что в кислой среде, которая имитирует выпадение кислотных дождей, происходит миграция тяжелых металлов из полученных образцов керамического кирпича. Поэтому керамический кирпич, полученный с использованием осадка очистных сооружений гальванического производства, может быть рекомендован только при строительстве многослойных стен для внутренних слоёв, чтобы исключить воздействие на него агрессивных факторов внешней окружающей среды.

Таблица 2 – Концентрация ионов тяжелых металлов в растворах после экстрагирования в течение 25 лет

Содержание отхода, масс. %	pH	Концентрация		
		Zn ²⁺ , мг/л	Ni ²⁺ , мг/л	Fe _{общ} , мг/л
5	3,5	Н	Н	2,75
5	5,5	8,57	Н	Н
10	3,5	Н	Н	16,25
10	5,5	10,62	Н	Н

Примечание. Н – ниже предела обнаружения

Таким образом, для определения экологической безопасности керамических изделий, полученных с использованием отходов производства, рекомендуется производить изучение миграции из них опасных веществ, входящих в состав отходов, в условиях, имитирующих их эксплуатацию. При этом очень важно также изучать временной фактор, учитывая длительный срок эксплуатации керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Залыгина, О.С. Переработка земли формовочной горелой / О.С. Залыгина, В.И. Чепрасова, Д.П. Новицкая // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – №3 (2022) – С. 89-101.
2. Зайнуллин, Х.Н. Утилизация осадков сточных вод гальванических производств / Зайнуллин Х.Н. [и др.]. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. – 272 с.
3. Zalyhina, V. Paper industry slag for the production of building ceramics / V. Zalyhina, V. Cheprasova, V. Romanovski // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. № 97(11). P. 3091-3099.

СРАВНЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФОРМАЛЬДЕГИДА

Формальдегид является одним из наиболее распространенных промышленных загрязнителей сточных вод. Он применяется в производстве смол, пластмасс, древесных материалов, текстиля и фармацевтики. Высокая токсичность формальдегида требует его эффективного удаления из сточных вод перед сбросом в окружающую среду.

Наиболее распространенные методы удаления формальдегида включают абсорбцию, адсорбцию, биологическую очистку и химическое окисление.

В данной работе проводится сравнительный анализ эффективности трех окислительных методов:

- Пероксид водорода (H_2O_2)
- Озон (O_3)
- Реактив Фентона ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$)

Предварительная обработка сточных вод сульфитом натрия (Na_2SO_3) позволяет уменьшить содержание формальдегида и повысить эффективность дальнейшего окисления.

Материалы и методы.

Образцы сточных вод. Сточные воды с содержанием формальдегида в диапазоне от 1 до 100 мг/л подвергались предварительной обработке сульфитом натрия с последующим окислением тремя методами.

Подготовка проб. Каждая проба сточных вод (1 л) готовилась с добавлением заданной концентрации формальдегида. Для предварительной обработки использовался 10%-ный раствор сульфита натрия, добавляемый в стехиометрическом соотношении.

Окислительные методы.

1. Пероксид водорода: Вода обрабатывалась 30%-ным H_2O_2 в дозировке 1:1 по отношению к формальдегиду. Реакция проводилась при pH 6,5-8,0.

2. Озонирование: Озон подавался в реактор со скоростью 1 г/ч. Контактное время составляло 15-30 минут.

3. Реактив Фентона: Раствор H_2O_2 (30%) и FeSO_4 добавляли при pH 2,5-3,0, поддерживая молярное соотношение $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2 = 1:10$.

Результаты и обсуждение.

Все три метода продемонстрировали различную эффективность в зависимости от исходной концентрации формальдегида и условий проведения реакции (таблица 1).

Результаты показали, что реактив Фентона обеспечивает наибольшую степень очистки, особенно при высоких концентрациях формальдегида.

Озонирование оказалось наиболее эффективным при низких концентрациях (<10 мг/л).

Пероксид водорода показал умеренную эффективность, особенно при высоких концентрациях загрязнителя.

Таблица 1 – Эффективность очистки в зависимости от исходной концентрации формальдегида и условий проведения реакции

Метод	Концентрация формальдегида, мг/л	Эффективность, %
Пероксид водорода	1-10	75-85
	10-100	50-60
Озонирование	1-10	90-95
	10-100	70-80
Реактив Фентона	1-10	95-98
	10-100	85-92

Окисление пероксидом водорода. Основные преимущества метода: простота использования; отсутствие образования токсичных газов, экологичность.

Недостатки: низкая эффективность при высоких концентрациях формальдегида, возможность образования промежуточных соединений (муравьиная кислота, метанол), требуется строгий контроль дозировки.

Озонирование. Основные преимущества: высокая окислительная способность, эффективность при низких концентрациях формальдегида, отсутствие необходимости в дополнительных реагентах.

Недостатки: высокие капитальные затраты на оборудование, требуется постоянный контроль за генерацией озона, возможность образования токсичных побочных соединений.

Реактив Фентона. Реактив Фентона – это комбинация пероксида водорода и солей железа, которая значительно усиливает образование гидроксильных радикалов и способствует быстрому разложению органических загрязнителей. Процесс наиболее эффективен при подкисленном pH (2,5-3,0), что обеспечивает максимальную активность каталитической реакции.

Основные преимущества: высокая степень очистки (до 98%), быстрое разложение формальдегида, возможность комбинирования с другими методами.

Недостатки: требуется подкисление среды, образование осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$, требующего удаления, высокие эксплуатационные затраты.

Экономическая оценка методов окисления формальдегида (таблица 2).

Таблица 2 – Экономическая оценка методов

Метод	Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты	Эффективность при низких концентрациях	Эффективность при высоких концентрациях
Пероксид водорода	Низкие	Средние	Средняя	Низкая
Озонирование	Высокие	Средние	Высокая	Средняя
Реактив Фентона	Средние	Высокие	Высокая	Высокая

Сравнение методов показало, что:

- Озонирование наиболее эффективно при низких концентрациях формальдегида, но требует значительных капитальных вложений.
- Пероксид водорода показал умеренную эффективность, особенно при высоких концентрациях загрязнителя, но требует строгого контроля дозировки.
- Реактив Фентона обеспечивает наибольшую степень очистки, но требует подкисления среды и последующего удаления осадка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith, R., et al. Sulfite-Based Pretreatment of Formaldehyde-Contaminated Wastewater // Water Science and Technology. 2017. P. 1685-1694.
2. Guo, J., et al. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment // Environmental Science & Technology. 2016. V. 205. P. 187-204.
3. Zhang, L., et al. Decomposition of Formaldehyde in Aqueous Solutions by Hydrogen Peroxide // Journal of Hazardous Materials. 2018. V. 44. P. 297-303.
- 4 Beltrán-Heredia, J., et al. Ozonation of Organic Pollutants in Water // Water Research. 2017. V. 213. P. 118-153.
- 5 Chen, X., et al. Combined Ozone and Hydrogen Peroxide Process for Formaldehyde Removal // Chemical Engineering Journal. 2019. V. 147. P. 311–318.
- 6 Liu, Y., et al. Fenton Oxidation of Formaldehyde in Industrial Wastewater. // Journal of Environmental Management. 2015. P. 2754-2773.
- 7 Wang, Z., et al. Optimization of Fenton Process Parameters for Formaldehyde Degradation // Chemosphere. 2020. V. 30. P. 90397–90409.

С.Г. Давыдова, доц., канд. геогр. наук
(НовГУ им. Ярослава Мудрого,
Новгородский филиал РАНХиГС, г. Великий Новгород, Россия);
О.Д. Притула, зав. кафедрой, канд. экон. наук
(Новгородский филиал РАНХиГС, г. Великий Новгород, Россия)

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНСКОЙ И ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

На сегодняшний день электроэнергетика – одна из ведущих отраслей народного хозяйства, без которой невозможно обойтись в современную эпоху – эпоху стремительного роста и развития науки и техники. Центральными элементами данной отрасли являются электростанции, на которых осуществляется производство электроэнергии, а в дальнейшем осуществляется ее доставка потребителям по линиям электропередач.

Электроэнергетика делится на два вида: традиционную, включающую тепловые электростанции (ТЭС), гидравлические (ГЭС), атомные (АЭС), и нетрадиционную (ветровая энергетика, приливная, геотермальная, водородная, энергия Солнца, биотопливо). Каждый вид производства энергии имеет свои преимущества и недостатки. Так или иначе электростанции оказывают воздействие на все компоненты окружающей среды: атмосферу, гидросферу, литосферу. В настоящее время это воздействие приобретает глобальный характер, затрагивая все компоненты нашей планеты [1].

Большое внимание в этом секторе народного хозяйства следует уделять вопросам деятельности атомных электростанций, с учетом того, что атомная (ядерная) энергетика является одним из источников-производителем электрической энергии. При этом важно учитывать, что всего на территории России функционирует одиннадцать атомных электростанций. Анализ деятельности атомных электростанций, их преимуществ и потенциальных уязвимостей, является многоаспектной задачей, требующей учета региональной специфики из-за различий в экологическом воздействии [2].

На территории Центрального и Северо-Западного Федерального округа находятся несколько атомных электростанций, но рассмотрим лишь те, которые расположены ближе всего к Новгородской области – Ленинградскую АЭС (ЛАЭС) и Калининскую АЭС (КАЭС). ЛАЭС начала свою работу четвертой, а КАЭС – восьмой в стране.

В контексте географического положения КАЭС находится на территории Удомельского муниципального образования Тверской об-

ласти. Можно отметить ее удаленность от Москвы – 380 км и Санкт-Петербурга 450 км.

Станция оборудована четырьмя энергоблоками, работающими на водо-водяных реакторах типа ВВЭР-1000, каждый из которых имеет мощность 1000 МВт, разделенные на две очереди. С момента запуска первого энергоблока в 1984 году до начала работы последнего в 2011 году, станция стала неотъемлемой частью энергетической системы региона. КАЭС играет ключевую роль в экономике Тверской области, генерируя 80% всей электроэнергии региона и составляя 20% общего объема товарной продукции области. Особенно значительно влияние станции в экономике Удомельского района, где на ее долю приходится 98% промышленного производства [3].

Калининская АЭС получила высокую оценку за свою экологическую ответственность, получив награду в рамках Всероссийского конкурса за лучшую природоохранную деятельность в сфере атомной энергетики за 2022 год. Это признание подчеркивает эффективность работы станции в обеспечении экологической безопасности и устойчивого развития, что включает минимизацию воздействия на окружающую среду, персонал и население. Такие меры способствуют сохранению и поддержанию природных систем и их жизненно важных функций.

На данной электростанции функционируют четыре энергоблока, из которых два оснащены реакторами РБМК-1000 и еще два – современные ВВЭР-1200. Эти блоки рассчитаны на 60 лет эксплуатации с возможностью продления до 80 лет. В процессе – запуск еще двух блоков № 7 и № 8 с реакторами ВВЭР-1200 в 2030 и 2032 годах, которые заменят старые блоки № 3 и № 4. Ожидается, что производство каждого из новых блоков превысит 8.5 млрд кВтч электроэнергии в год. Экологический мониторинг на территории КАЭС включает оценку всех аспектов экологического воздействия деятельности станции, включая радиационное, химическое и тепловое загрязнение. Контроль осуществляется не только на территории самой АЭС, но и в прилегающих санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения. Санитарно-защитная зона, определенная распоряжением администрации Удомельского района, имеет радиус 1.2 км от центра вентиляционных труб всех энергоблоков и включает в себя дополнительные территории, такие как сбросной канал на градирни. Важной задачей является также мониторинг через сеть из 124 скважин. Так же проводится мониторинг атмосферного воздуха и состояния почв.

Ленинградская АЭС находится в 42 километрах от города Санкт-Петербург, на берегу Финского залива, в 2022 году она установила новый рекорд по производству электричества, достигнув отметки

31 млрд. 403 млн. кВтч, что составило 30% от общего объема производства энергии Энергосистемы Северо-Запада. Вклад Ленинградской АЭС в энергоснабжение Санкт-Петербурга и Ленинградской области достиг 59,39 % [4].

На Ленинградской АЭС установлены реакторы двух типов: водно-графитовые РБМК-1000 канального типа на тепловых нейтронах и водно-водяные ВВЭР-1200. Станция включает 6 энергоблоков: четыре РБМК-1000 и два ВВЭР-1200, первый и второй блока были выведены из эксплуатации в 2018 году и 2020 году соответственно. Ленинградская АЭС, соблюдая экологические нормы РФ, так же осуществляет радиационный и химический контроль в санитарно-защитных зонах. Это включает зоны вокруг реакторов РБМК-1000 с радиусом 1.5 км и зоны вокруг блоков ВВЭР-1200, которые ограничены размерами промышленной площадки и зоной наблюдения радиусом 17 км [5]. На ЛАЭС активно используется система АСКРО, которая обеспечивает дистанционное дозиметрическое контролирование. Эта система способствует автоматизированному и оперативному наблюдению за радиационным фоном не только на территории станции, но и в прилегающих зонах. На рассматриваемых АЭС разработана и реализуется «Экологическая политика». Соответствующая международным стандартам в области защиты окружающей среды. Эта политика направлена на создание таких условий, которые максимально эффективно способствуют безопасности и минимизируют риски возникновения чрезвычайных ситуаций [6]:

- Улучшение условий для безопасного хранения использованного ядерного топлива и радиоактивных отходов на территории атомных электростанций, а так же решение уже существующих экологических проблем;

- Строгое соблюдение всех законов и нормативных актов Российской Федерации, а также национальных и отраслевых стандартов, касающихся эксплуатации энергоблоков атомных станций, защиты окружающей среды и здоровья работников и населения;

- Развитие и улучшение системы подготовки атомных электростанций к быстрому и эффективному реагированию на чрезвычайные ситуации.

В рамках обеспечения экологической безопасности на АЭС действует производственный экологический контроль, который направлен на соблюдение соответствия экологических стандартов, законов о защите природы, рациональное использование природных ресурсов и мер по защите окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин В.М. Атомные станции. – Москва: Издательский дом

МЭИ, 2012. – 671 с.

2. Основы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций: учебное пособие. – Москва: 2023. – 72 с.

3. Калининская АЭС / [Электронный ресурс] // Росэнергоатом: URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-kalininskoy-aes/ (дата обращения: 20.12.2024).

4. Отчет об экологической безопасности за 2022 год [Электронный ресурс] // Росэнергоатом Калининская АЭС. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/cf6/cf63abf0e656ae587f7be35382190f73.pdf> (дата обращения: 03.03.2024).

5. Ленинградская АЭС / [Электронный ресурс] // Росэнергоатом: URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-leningradskoy-aes/ (дата обращения: 27.12.2024).

6. Станции и проекты [Электронный ресурс] / Росэнергоатом: URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/ (дата обращения: 27.12.2024).

УДК 631.86

В.М. Босак, праф., д-р с.-г. навук;

Т.У. Сачыўка, дац., канд. с.-г. навук;

А.У. Дамнянкова, дац., канд. с.-г. навук (БДТУ, г. Мінск)

АГРАЭКАЛАГІЧНЫЯ АСПЕКТЫ ВЫКАРЫСТАННЯ АРГАНІЧНЫХ УГНАЕННЯЎ

Арганічныя ўгнаенні – гэты ўгнаенні, якія ўтрымліваюць пажыўныя рэчывы ў форме арганічных злучэнняў расліннага ці жывёльнага паходжання [1].

Арганічным угнаенням належыць адмысловая роля ў аднаўленні глебай урадлівасці, павелічэнні ўраджайнасці сельскагаспадарчых культур і паляпшэнні іх якасці. Да найбольш распаўсюджаных арганічных угнаенняў у Рэспубліцы Беларусь належаць падсцілачны і безпадсцілачны гной, птушыны памёт, сапрапель, зялёнае ўгнаенне, а таксама разнастайныя кампосты (торфагнаевыя, торфапамётныя, вермікампосты, з выкарыстаннем саломы, лігніну, раслінных, драўняных і бытавых лішкаў і г. д.) [2–15].

Сістэматычнае выкарыстанне арганічных угнаенняў садзейнічае назапашванню гумусу, паляпшае фізіка-хімічныя ўласцівасці глебы (павялічвае запас пажыўных рэчываў, паніжае кіслотнасць, павялічвае вільгацяёмістасць і вільгацэпранікальнасць, абагачае глебу мікрафлорай, павялічвае яе біялагічную актыўнасць і выдзяленне вуглекісла-

ты), памяншае супраціўленне глебы пры механічнай апрацоўцы, стварае аптымальныя ўмовы для мінеральнага жыўлення раслін, павялічвае ўстойлівасць земляробства пры неспрыяльных умовах надвор'я.

У агульным балансе элементаў жыўлення, якія штогод уносяцца пад сельскагаспадарчыя культуры, на долю арганічных угнаенняў прыходзіцца каля 40 %. Прыблізна 75 % арганічных угнаенняў ад унесенай колькасці мінералізуецца і ўдзельнічае ў жыўленні раслін, а 25 % гуміфікуецца і ўдзельнічае ў папаўненні страты гумусу.

Пры вызначэнні доз арганічных угнаенняў улічваецца ўзровень плануемага ўраджаю, грануламетрычны склад глебы, утрыманне гумусу, а таксама біялагічныя асаблівасці сельскагаспадарчых культур. Арганічныя ўгнаенні выкарыстоўваюць перш-наперш пры вырошчванні бульбы, кукурузы, цукровых буракоў, кармавых караняплодаў, садавіны і агародніны, азімай збажыны, аднагадовых і шматгадовых траў, на сенажах [6].

Галоўная ўмова эфектыўнага выкарыстання арганічных угнаенняў – раўнамернае іх размеркаванне ў аптымальныя тэрміны і своечасовае загортванне ў глебу. Пры раскідванні гною без загортвання за 4 гадзіны страты аміячнага азоту дасягаюць да 55 %, за 12 гадзін – 65 %, за 24 гадзіны – 70 %, за 48 гадзін – да 80 % [6].

Сярэднегадавыя дозы арганічных угнаенняў у севазваротах для падтрымання бездэфіцытнага і дасягнення станоўчага балансу гумусу залежаць ад тыпу і грануламетрычнага складу глебы, утрымання гумусу і суадносін паміж прапашнымі культурамі і шматгадовымі травамі (табліца).

Табліца – Нарматывы патрэбы ў арганічных угнаеннях на дзярнова-падзолістых глебах

Падтрыманне бездэфіцытнага баланса гумусу, т/га												
Глебы	% прапашных культур											
	10				20				30			
	% шматгадовых траў											
	15	20	30	40	15	20	30	40	15	20	30	40
Суглінак	10	9	7	6	14	13	11	10	16	15	13	12
Супесак	12	11	9	8	16	15	13	12	18	17	15	14
Пясок	14	13	11	10	19	18	16	15	—	—	—	—
Дадатковая патрэба для дасягнення станоўчага баланса гумусу, т/га												
Утрыманне гумусу, %	Грануламетрычны склад глебы											
	суглінак				супесак на марэне		супесак на пяску		пясок			
до 1,50	3,0				3,4		3,8		4,3			
1,51–2,00	2,0				2,3		2,6		3,0			
2,01–2,50	1,0				1,2		1,4		1,7			
болей 2,50	0,5				0,6		—		—			

Усе віды работ з арганічнымі ўгнаеннямі павінны ажыццяўляцца згодна дзеючаму заканадаўству па ахове працы, санітарным нормам, патрабаванням аховы працы і асабістай гігіены.

ЛІТАРАТУРА

1. Босак, В.Н. Органические удобрения / В.Н. Босак // Республика Беларусь: энциклопедия. – Минск: Беларуская энцыклапедыя. – 2007. – Т. 5. – С. 590–591.
2. Босак, В. Агроэкономическая эффективность применения органических удобрений / В. Босак // Аграрная экономика. – 2015. – № 12. – С. 50–55.
3. Босак, В.М. Роля мінеральных і арганічных угнаенняў у забеспячэнні харчовай бяспекі / В.М. Босак, Т.У. Сачыўка, А.У. Дамнянкова // Химическая технология и техника. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 513–515.
4. Босак, В.Н. Агроэнергетическая эффективность применения удобрений при возделывании кормовых культур / В.Н. Босак // Кормопроизводство: технологии, экономика, почвосбережение. – Минск: ИВЦ Минфина, 2009. – С. 28–31.
5. Босак, В.Н. Бесподстильный навоз: свойства и особенности применения / В.Н. Босак // Наше сельское хозяйство: агрономия. – 2014. – № 15. – С. 78–79.
6. Босак, В.Н. Органические удобрения / В. Н. Босак. – Пинск: ПолесГУ, 2009. – 256 с.
7. Босак, В.Н. Применение органических удобрений и динамика содержания гумуса в Полесском регионе Беларуси / В.Н. Босак // Европейское Полесье – хозяйственная значимость и экологические риски. – Минск: Минсктиппроект, 2007. – С. 101–103.
8. Босак, В.Н. Птичий помет: состав и применение / В.Н. Босак // Наше сельское хозяйство: агрономия. – 2015. – № 9. – С. 42–43.
9. Босак, В.Н. Условия эффективного применения органических удобрений / В.Н. Босак // Наше сельское хозяйство. – 2010. – № 3. – С. 28–32.
10. Босак, В.Н. Экономическая и энергетическая эффективность применения органических удобрений / В.Н. Босак // Научные труды БГЭУ. – Минск: БГЭУ, 2010. – С. 52–57.
11. Домненкова, А.В. Состояние и перспективы развития альтернативной энергетики в Беларуси / А.В. Домненкова, В.Н. Босак, И.И. Сергеева // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства. – Горки: БГСХА, 2025.
12. Лапа, В. В. Применение торфокомпостов в сельском хозяйстве Республики Беларусь / В. В. Лапа, В.Н. Босак // Агроэкологіче-

ские проблемы использования органических удобрений на основе отходов промышленного производства. – Владимир, 2006. – С. 136–137.

13. Лапа, В.В. Применение торфокомпостов в сельскохозяйственном производстве / В.В. Лапа, В.Н. Босак // Белорусское сельское хозяйство. – 2006. – № 10. – С. 27–28.

14. Переработка навоза в биогазовых установках / Д.Ф. Кольга, С.А. Костюкевич, Т.В. Молош, В.Н. Босак // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2024. – № 3. – С. 7–11.

15. Состав и эффективность различных видов органических удобрений / В.Н. Босак, Т.М. Серая, В.В. Цвирков, О.Н. Марцуль // Земляробства і ахова раслін. – 2008. – № 6. – С. 39–42.

УДК 628.162

С.Н. Гладких, доц., канд. техн. наук
(НовГУ, г. Великий Новгород, Россия)

О СОСТОЯНИИ ПРИРОДНОЙ И ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА

Источник питьевого водоснабжения Великого Новгорода – река Волхов. Чтобы вода источника была безвредной, необходим постоянный контроль (мониторинг) ее качества. В настоящее время ее воды характеризуются как «загрязненные».

Комплексной оценкой качества вод является индекс загрязненности вод (ИЗВ). С 2006 года введено новое наименование – удельный комбинаторный индекс загрязненности вод (УКИЗВ) – комплексный показатель степени загрязненности вод. По данным Новгородского областного Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды качество воды в реке в последние годы не меняется и по значениям УКИЗВ характеризуются как «загрязненные» (3 класс, разряд «а» створ 1, разряд «б» створ 2).

Воды реки в районе города на протяжении нескольких лет загрязнены медью, марганцем, железом. Значения бихроматной окисляемости (ХПК) по-прежнему превышают норму, что свидетельствует о загрязнении вод органическими веществами как в створе №1, так и в створе №2.

Створ 1 «Юрьево» расположен на 1 км выше территории Великого Новгорода по течению р. Волхов – отражает фоновое содержание загрязняющих веществ в воде.

Створ 2 «Котовицы» расположен на 15 км ниже территории Великого Новгорода по течению р. Волхов – отражает контрольное содержание загрязняющих веществ в воде. Пункты контроля качества

поверхностных вод организованы для получения информации о качестве воды р. Волхов в створе №1 – с 1965 г., в створе №2 – с 1977 г.

Основные загрязнители реки Волхов Великого Новгорода – промышленность, коммунально-бытовое водоснабжение, транспорт. Высокий уровень загрязнения был отмечен еще в восьмидесятые годы прошлого века.

Качество воды в реке в последние годы не меняется, содержит тяжелые металлы, органику [1]. Проблема качества питьевой воды чрезвычайно актуальна, так как от нее зависит здоровье человека. Тяжелые металлы, накапливаясь в организме человека, становятся причиной ряда заболеваний печени, почек, нервной системы, желудочно-кишечного тракта и т.д.

Органические вещества поражают печень, почки, нервную и кровеносную системы, повышают риск возникновения онкологических заболеваний [2].

Река Волхов отличается высокой цветностью. Кроме того, находится в худших условиях по мутности и окисляемости.

Целью и задачей работы являлось определение состава и качества питьевой воды в Великом Новгороде, в реке Волхов, изучение отечественный и зарубежный опыт очистки природных и сточных вод и разработка эффективного и экономичного способа очистки природных вод от органических загрязнений и тяжелых металлов.

Основные методы очистки питьевой воды: физические (отстаивание, процеживание), химические, биологические, физико-механические [3-5].

За рубежом, для улучшения качества питьевой воды используют методы доочистки воды с использованием сорбентов (активированные угли, ионообменные смолы). Сдерживает их применение – дороговизна [6,7]. Необходимы эффективные, экологически безопасные и по возможности экономичные методы очистки. Таким требованиям в полной мере отвечает сорбционный метод с использованием алюмосиликатного адсорбента.

В работе разработана новая технология очистки природных вод от ионов тяжелых металлов и органики с использованием алюмосиликатного адсорбента без обработки воды реагентами. Он обладает высокими сорбционными свойствами, высокой механической прочностью. Опыт его использования в производственных условиях свидетельствует об его высокой эффективности при очистке природных вод от тяжелых металлов и органических соединений.

Анализы проводились в центре гигиены и эпидемиологии по Новгородской области. Свинец: содержание зимой (взвешенная форма

0,8; растворенная форма 0,63), содержание весной (взвешенная форма 1,37; растворенная форма 0,58). Медь: содержание зимой (взвешенная форма 17; растворенная форма 2), содержание весной (взвешенная форма 6; растворенная форма 4). Магний: содержание зимой (взвешенная форма 2,5; растворенная форма 15), содержание весной (взвешенная форма 21; растворенная форма 15,3). Железо: содержание зимой (взвешенная форма 1,5; растворенная форма 0,62), содержание весной (взвешенная форма 2,3; растворенная форма 4,5).

Пробу питьевой воды для анализа были отобраны в следующих точках Великого Новгорода: Воскресенский бульвар, улица Десятинная, улица Химиков, проспект Александра Корсунова, проспект Мира, улица Щусева, улица Белова.

Воду проверяли по нескольким критериям: хлориды, жесткость, летучий хлор, железо, цветность, рН. Получены следующие результаты: жесткость, содержание хлоридов и летучего хлора во всех точках соответствует предельно допустимой концентрации (ПДК).

Цветность колеблется от 18 до 27,4 град. (ПДК=20 град), содержание железа 0,23-0,44 мг/дм³ (ПДК=0,3 мг/дм³), то есть почти во всех пробах превышает норму, самое высокое содержание железа оказалось в районе проспекта Мира, проспекта Корсунова.

На Воскресенском бульваре три показателя не соответствуют норме: жесткость – 7,2 ммоль/дм³ (ПДК=7,0 ммоль/дм³), цветность 27,3 град., рН = 5,07 (ПДК=6-9). Это объясняется тем, что в центре города, система водоснабжения изношена сильнее всего.

Рассмотрено влияние качества питьевой воды на здоровье человека. Представлены результаты исследования питьевой воды, воды реки Волхов на содержание тяжелых металлов и органических веществ. Рассмотрены современные методы очистки природных вод, предложен сорбционный – с использованием алюмосиликатных адсорбентов, как наиболее эффективный и экономичный, позволяющий очищать воду без предварительной обработки ее коагулянтами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индекс загрязненности вод (ИЗВ) р. Волхов в районе Великого Новгорода URL: <https://www.adm.nov.ru/page/23530> (дата обращения: 29.12.2024).

2. Гладких С. Н. Воздействие загрязнения питьевой воды на здоровье // Проблемы социально-экономического развития федерации на современном этапе: материалы Международной научно - практической конференции. СПб.: 2006. С. 305-313.

3. Современные методы очистки питьевой воды URL: <https://diasel.ru/article/sovremennyye-metody-ochistki-pitevoj-vody/> (дата обращения: 28.12.2024).

4. Гладких С.Н., Семчук Н. Н. Экология воды Великого Новгорода // Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность: сборник материалов II Национальной (Всероссийской) конференции ученых 17–19 мая 2021 г. ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово. 2021. С.63-64.

5. Гладких С.Н., Дмитрук Н. Г., Дружнова М. П. Исследование и очистка природной и питьевой воды Великого Новгорода / Современные подходы к развитию агропромышленного, химического и лесного комплексов. Проблемы, тенденции, перспективы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород. 2021. С. 390-395.

DOI: 10.34680/978-5-89896-744-4/2021.AIC

6. De Gisi, G. Lofrano, M. Grassi, M. Notarnicola Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review // Sustainable Materials and Technologies, 2016. N.9. P. 10-40.

7. Abdel-Shafy, H. I. Chemical Treatment for Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater // Egyptian Journal of Chemistry, 2015. Vol. 58. Iss. 1. P. 1–12.

УДК 628.3:621.3

В.Н. Штепа, зав. кафедрой, д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск);

А.В. Бобрикович, Ю.В. Бобрикович (МРК, г. Минск)

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С учётом многопараметричности, сложности формализации, нестационарности, нелинейности процессов, происходящих при очистке сточных вод (СВ), крайне востребованным и актуальным становится создание продуктовых решений, которые бы аналитически поддерживали соответствующее управление [1, 2]. Одними из важных задач являются: прогнозирование показателей качества СВ, как временных рядом, и регрессионное моделирование работы очистных сооружений (ОС) [3]. Для таких целей вполне целесообразно разработать программный продукт на основе нейронных сетей (НС).

Созданное решение использует базу SQLite3, которая хранит наборы параметров в одном файле, обеспечивая простоту использования и легкость развертывания. Дополнительно SQLite3 поддерживает

стандартный SQL и предоставляет функции для работы с данными, такие как: создание таблиц, выполнение запросов, индексирование и транзакции. Логика программного обеспечения (ПО) написана на Python 3.7: имеются встроенные возможности для работы с файлами, строками, списками, словарями, функциями и другими структурами. Интерфейс ПО был реализован с помощью фреймворка Tkinter (стандартная библиотека для создания графического пользовательского интерфейса (GUI)). На рис. 1 представлено окно «Открыть импорт» программного продукта.

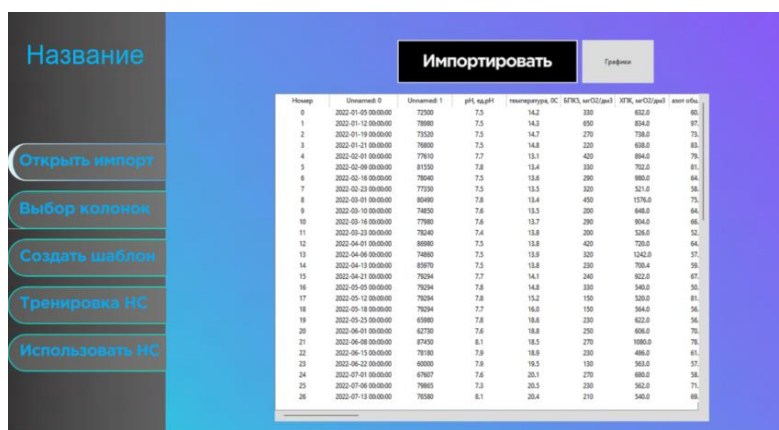


Рисунок 1 – Интерфейс окна «Открыть импорт» программного нейросетевого модуля

Реализован переход на вкладку «Тренировка НС» (рис. 2). В поле «Количество эпох» обеспечено ведение числа эпох для обучения НС (в целых натуральных числах), а в поле «Тест выборка (%)» процента для тестовой выборки при обучении нейросети, как правило 20%. После ввода всех данных на этой вкладке следует обучить нейросеть путем выбора в меню с левой стороны шаблона, потом нажать кнопку «Train».

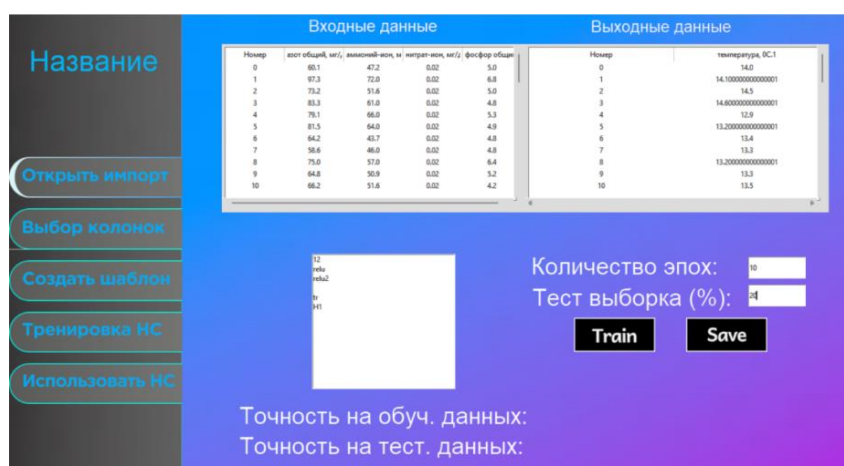


Рисунок 2 – Интерфейс вкладки «Тренировка НС» программного нейросетевого модуля

Используя фактические наборы параметров, полученные на основе работы системы сбора информации на реальных очистных сооружениях [4], провели апробацию программного модуля в контексте качества синтеза НС прогнозирующей временной ряд показателя качества СВ «рН» (рис. 3).

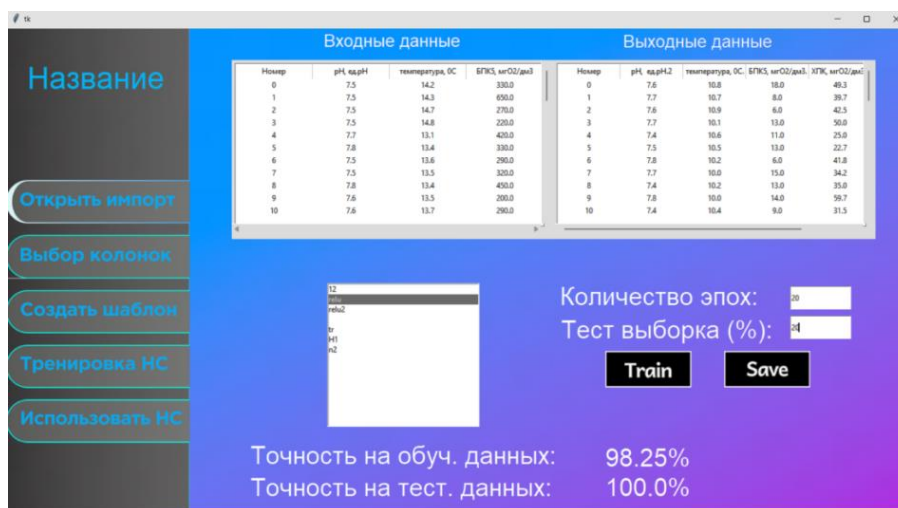


Рисунок 3 – Апробация программного нейросетевого модуля (на примере прогноза «рН» в входе очистных сооружений)

После обучения нейросети в нижней части экрана представлены метрики (см. рис. 3). Полученные данные (точность: на обучающей выборке – 98,23 %, тестирующей выборке – 100 %; отсутствует переобучение) позволяют сделать вывод о перспективности развития такого продуктового решения.

Программный нейросетевой модуль оценки параметров очистки СВ является продуктовым решением поддержки принятия решений и может дополнять базовое ПО цифровизации водопроводно-канализационных хозяйств [5].

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ
(договор №Ф23У-012 от 02.05.2023 года)*

ЛИТЕРАТУРА

1. Практическое использование информационно-аналитической системы оценки экологической безопасности водоотведения / В.Н. Штепа [и др.] // Искусственный интеллект в Беларуси, Минск, 12-13 октября 2023 года / Объединенный институт проблем информатики. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 251–256.
2. Системный анализ компьютерно-интегрированного комплекса мониторинга и прогнозирования рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах коммунально-промышленного водоотведения / В.Н. Штепа [и др.] // Инновационные технологии защиты от

чрезвычайных ситуаций, Минск, 28 сентября 2023 года. – Минск: УГЗ, 2023.– С. 20 – 21.

3. Предобработка данных и обоснование подходов использования нейросетевого прогнозирования значений pH сточных вод / В.Н. Штепа [и др.] // Интеллектуальные информационные системы: теория и практика: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской с международным участием конференции, Курск, 21-23 ноября 2023 года / Курский государственный университет; отв. ред. А.А. Халин. - Курск, 2023. - С. 166-173.

4. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В.Н. Штепа [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. - № 1 (133). - С. 149-155.

5. О задачах цифровизации систем водоотведения коммунально-промышленных объектов / И. В. Войтов [и др.] // Нефтегазохимия – 2023: материалы VI Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 1–3 ноября 2023 г. – Минск: БГТУ, 2023. – С. 147–151.

УДК 662.75

Е.Н. Макеева, зав. кафедрой, канд. техн. наук;
О.Ю. Морозова, ст. преп. (ГГТУ им. П. О. Сухого, г. Гомель)

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ПЕЧНОГО БЫТОВОГО ТОПЛИВА

В качестве резервного или аварийного источника топливоснабжения котельных и ТЭЦ длительное время являлся мазут, который фактически был стратегическим видом топлива, вследствие чего вопрос о его замене на какой-либо альтернативный вариант даже не рассматривался [1]. Однако, по решению Республиканской комиссии по контролю за осуществлением расчетов за природный газ, электрическую и тепловую энергию Совета Министров Республики Беларусь от 26.06.2011 года, в целях экономии топливно-энергетических ресурсов Министерству энергетики было поручено исключить сжигание топлива на поддержание мазутного хозяйства на пиковых котельных.

Кроме этого, вопрос, связанный с заменой резервного мазутного источника топливоснабжения пиковых котельных на альтернативный, очередной раз остро встал после получения рекомендаций Гомельского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей

среды от 17.05.2018 г., в связи с тем, что массовая доля выбросов серы в окружающую среду, образующаяся при сжигании мазута является крайне высокой (для мазута используемой марки М-100 составляет от 2,5-3% и более).

В связи с вышеизложенным была выполнена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива в соответствии с ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт» [2].

В соответствии с ТКП 17.02-XX-2019 «Охрана окружающей среды и природопользование. Наилучшие доступные технические методы для топливосжигающих установок теплоэнергетики» наиболее значимыми видами выбросов при сжигании органического топлива являются SO_2 , NO_x , CO, твердые частицы и парниковые газы, такие как CO_2 . Другие вещества, например, тяжелые металлы, фтороводород, галогенные соединения, несгоревшие частицы углеводородов, неметановые летучие органические соединения и диоксины выбрасываются в меньших количествах, однако могут оказывать значительное влияние на состояние окружающей среды из-за их токсичности или устойчивости [3].

Используемые для расчета характеристики мазута и печного бытового топлива приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики жидкого топлива согласно ТКП 17.08-04-2006

Наименование	Вид	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_p
		W_r	A	S	C	H	N	O	
Мазут мало-зольный	вид VI	1	0,04	2,7	82,4	13,16	-	0,7	39,64
Печное бытовое топливо	вид B	-	0,02	0,04	84,3	15,46	-	0,18	42,30

Для расчета были использованы данные из задания на проектирование по объекту: «Реконструкция топливного хозяйства РК «Черниговская» по ул. Черниговская, 22а в г. Гомеле» от 28.09.2018 и дополнения №1 к заданию на проектирование по объекту: «Реконструкция топливного хозяйства РК «Черниговская» по ул. Черниговская, 22а в г. Гомеле» от 01.09.2020 [4].

Расчеты проводились с учетом того, что оксиды серы в котле летучей золой не связываются, золоуловители и сероулавливающие

установки не используются. Максимальный расчетный расход топлива принимаем равным 5,9 т/ч [4, 5]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экологические параметры загрязняющих веществ

Вид загрязняющего вещества	Вид топлива	
	мазут	печное бытовое топливо
Количество серы диоксида M_{SO_2} , г/с	88,575	1,312
Суммарное количество азота оксидов M_{NO_x} в пересчете на азота диоксид (NO_2), г/с	2,175	2,424
Количество углерода оксида M_{CO} , г/с	3,75	4,007
Количество твердых частиц количество сажи M_c , г/с количество мазутной золы в пересчете на ванадий M_v , г/с	0,4 0,146	0,21 -

В результате сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие основным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам за счет уменьшения в 70 раз количества выброшенного в атмосферный воздух диоксида серы за 10 суток сжигания топлива, а также снижения концентрации данного вида выброса в 72,5 раза.

Кроме того, обеспечивается уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы при десятидневном использовании нового резервного вида топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозова, О.Ю. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23-24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. С. 142-145.
2. ТКП 17.08-04-2006 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт», 2006.
3. ТКП 17.02-XX-2019 «Охрана окружающей среды и природопользование Наилучшие доступные технические методы для топливосжигающих установок теплоэнергетики», 2019.
4. Схема теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой

до 2030 года: в 3 т. / сост.: А. Н. Рыков, О. А. Бушкевич. – М.: Проектное научно-исследовательское республиканское предприятие «БелНИПИЭнергоПром». 2018. Т. 1. ч. 1. 230 с.

5. Макеева, Е. Н. Перевод котельных на альтернативное топливо / Е. Н. Макеева, Э. Р. Зверева, О. Ю. Морозова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26, № 1. С. 107-117.

УДК 66. 047.75.4/5

А.А. Боровик, доц., канд. техн. наук;
С.К. Протасов, доц., канд. техн. наук (БГЭУ, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУХА РОГОЗА КАК СОРБЕНТА ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ

В мире остро стоит вопрос очистки воды от загрязнений. Сюда, прежде всего, относится ликвидация аварийных разливов нефти (ЛАРН) при ее добыче, перевозке, переработке и использовании (например, загрязнение Черного моря при аварии танкеров в Керченском проливе в декабре 2024 г). Для очистки загрязненной нефтью воды широко применяются различные сорбенты. При этом количество используемых при ЛАРН сорбентов велико и рациональным является применение сорбентов на основе природных возобновляемых материалов.

Одним из таких эффективных нефтесорбентов является пух початков рогоза. Рогозы массово растут по берегам рек, озер, прудов, стариц, каналов, водохранилищ и на болотах, образуя густые заросли. Стебель рогоза заканчивается цилиндрическим початком темно-бурого цвета. Початок состоит из множества пушинок, которые плотно в нем упакованы.

Сама пушинка состоит из стволика и прикрепленных к нему множества волосинок, образующих древовидную форму. Причем сорбционные свойства пуха обеспечиваются свободным пространством между волосинками и стволиками пушинок, а также между самими пушинками [1]. В таблице сравниваются основные показатели пуха рогоза и других сорбентов.

Из таблицы видно, что сорбент на основе пуха рогоза превосходит по основным показателям другие сорбенты от 2,9 до 83 раз. Плавать чистого пуха рогоза превышает 100 дней, а в насыщенном нефтью состоянии более 120 дней. Отработанный пух рогоза можно утилизировать биологическим методом.

Таблица – Сравнение показателей нефтесорбентов

Наименование нефтесорбента	Стоимость, бел. руб/кг	Нефтеемкость, г сорбата/г сорбента	Повторное использование, раз	Эффективность, кг сорбата/бел. руб
Пух рогоза	3,42	20	> 50	5,85
Ньюсорб	4,47	4,6–9	1	1,03–2,01
Вспененный графит	607	45–55	1	0,07–0,09
«СОНЕТ-1»	2	2–4	1	2–4

Но созревшие початки следует сразу собирать, поскольку качество пуха в них быстро ухудшается. Однако свежесобранные початки рогоза имеют высокую влажность, способствующую развитию различных микроорганизмов, плесени, грибков и личинок насекомых. Поэтому влажный пух следует высушивать до равновесного состояния. Например, если температура воздуха равна 18–20 °С, а относительная влажность 46–50 %, то равновесное влагосодержание пуха составляет $U_p = 0,11 \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. мат}}$, что обеспечивает неизменность показателей пуха в течение многих лет.

Авторами предложены 4 основных способа предварительной подготовки и последующей сушки пуха рогоза:

- 1) сушка цельных созревших початков в природных условиях или в конвективных сушилках до равновесного состояния;
- 2) предварительное распушивание початков с отделением пуха от стеблей, загрузка влажного пуха в конвективную сушилку и высушивание до требуемого влагосодержания;
- 3) распушивание початков рогоза, загрузка влажного пуха в маты с дальнейшей сушкой матов в конвективной сушилке;
- 4) распушивание початков рогоза, загрузка влажного пуха в маты с дальнейшей сушкой матов в естественных условиях.

Были проведены опытные исследования конвективной сушки цельных созревших початков рогоза. Построены зависимости влагосодержания и скорости сушки початков от времени. Установлено, что достичь состояния равновесия ($U_p = 0,11 \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. мат}}$) между початками и воздухом можно за время, приблизительно равное 8 часам.

Также экспериментально исследовалась конвективная сушка влажного пуха рогоза, отделенного от стеблей [2]. Построены зависимости влагосодержания пуха и скорости его сушки от температуры и скорости сушильного агента, начального влагосодержания пуха, его кажущейся плотности и высоты слоя в сушилке, проведен анализ опытных данных. Получены формулы для расчета времени сушки до равновесного влагосодержания в зависимости от перечисленных па-

раметров. Причем время достижения равновесного влагосодержания пуха $U_p = 0,11 \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. мат}}$ от его начального влагосодержания $U_n = 0,58 \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. мат}}$ не превышает 50 минут.

Проведены исследования естественной (без принудительной конвекции) сушки вертикально подвешенных матерчатых матов, наполненных пухом рогоза, в закрытых помещениях [3]. Построены кривые сушки и кривые скорости сушки для различного начального влагосодержания пуха. Получены формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки. Установлено, что в условиях естественной сушки пуха при комнатной температуре его равновесное состояние достигается приблизительно за 20 часов.

Выполняя анализ достоинств и недостатков каждого из перечисленных способов сушки пуха рогоза, можно сделать следующие выводы.

Сушка цельных початков рогоза не требует предварительного распушивания, что упрощает процесс. Однако вследствие высокого диффузионного и термического сопротивления переносу массы и тепла время высушивания велико. Кроме того, по мере высыхания початки начинают самораспушиваться с отрывом пушинок. Сухой пух рогоза вследствие очень низкой плотности обладает высокой летучестью, поэтому его очень трудно собрать, а затем использовать в качестве сорбента в свободном состоянии (особенно в условиях ветреной погоды).

Этот же недостаток характерен и 2-го способа сушки при выгрузке высушенного пуха из конвективной сушилки и последующего его использования. Однако предварительное распушивание влажных початков во 2-ом способе перед загрузкой в сушильный аппарат не приводит к уносу пуха воздухом (влажный пух вследствие большей плотности не обладает высокой летучестью). Кроме того, в процессе предварительного распушивания влажный пух существенно подсыхает и время сушки в сушилке значительно снижается. Также при осуществлении 2-го способа не производится сушка стеблей рогоза, в которых сосредоточено относительно много влаги. Этим достигается экономия энергии (тепла на сушку и электроэнергии на работу вентиляторов) и значительно ускоряется высушивание.

Наиболее рациональными, исходя из вышесказанного, являются 3-ий и 4-ый способы сушки, поскольку при распушке початков и загрузке влажного пуха в маты не будет происходить его унос воздухом. Но самым главным достоинством этих способов, на наш взгляд, является то, что маты с высушенным до равновесия пухом можно не толь-

ко хранить достаточно длительное время в помещениях, но и максимально быстро и удобно осуществлять их погрузку и доставку к месту аварий с последующим использованием при ЛАРН. Кроме этого, маты достаточно просто и удобно размещать на водных поверхностях и, в некоторых случаях, на поверхностях земли, загрязненных нефтью или нефтепродуктами (загрязняющими веществами). Маты, насыщенные загрязняющими веществами, можно легко поднять с поверхности и осуществить регенерацию. Регенерацию можно проводить, например, методом отжима, пропуская маты между вращающимися вальцами и собирая загрязняющие вещества в специальную емкость. Регенерированные маты можно повторно использовать для очистки поверхностей.

Очевидно, что 4-ый способ сушки значительно более экономичнее 3-го способа, поскольку для испарения влаги используется теплота окружающего воздуха, а не калорифера. Кроме того, не требуется установка и работа вентиляторов. Однако сушка в естественных условиях требует наличия соответствующих помещений. Также естественная сушка значительно более продолжительная, чем конвективная. Поэтому 4-ый способ предпочтительнее для заготовки и длительного хранения определенных запасов пуха рогоза в матах. Третий способ следует применять в случаях массового загрязнения обширных акваторий или территорий нефтью или нефтепродуктами, когда имеющихся запасов пуха рогоза в матах и других сорбентов недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов С.К., Горовых О.Г., Боровик А.А., Саевич. К.Ф. Получение нефтесорбента на основе волосков гинофора летучек рогоза. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. № 8. 2021. С. 33–38.
2. Протасов С.К., Боровик А.А., Брайкова А.М. Расчет времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке. Мичуринский агрономический вестник, №2. 2023. С. 65–74.
3. Протасов С.К., Боровик А.А., Брайкова А.М. Естественная сушка пуха рогоза. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 9. 2023. С. 527–530.

И.Х. Аюбова, доц., д. ф. п. н.;
О.К. Юнусов, и. о. проф., канд. техн. наук
(ТГТУ, г. Ташкент, Узбекистан)

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ ТРЕБОВАНИЙ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

Развитие промышленности с одной стороны реализует экономические интересы государства общества и личности, но с другой даже любой современный производственный процесс оказывает в той или иной степени негативное влияние на окружающую природную среду. Во-первых, это связано с постоянным расширением объемов использования (потребления) природных ресурсов, приводящим истощению данных ресурсов. Во-вторых, негативным воздействием на окружающую среду, которое также приводит к отрицательным изменениям природных объектов и комплексов.

Исходя из этого, все больше возрастает роль специалистов по промышленной экологии в организации и регулировании производственного процесса, а также решении экологических вопросов на местном (локальном) уровне. Для этого данные специалисты должны обладать достаточным объемом знаний по природопользованию и охране окружающей природной среды на соответствующем качественном уровне.

Далее немаловажным фактором является умение применить на практике свои знания, ибо это влияет на результативность профессиональной деятельности специалистов по промышленной экологии.

Однако, сваливать всю ответственность за принимаемые экологические решения на производстве и сваливать всю вину за неблагоприятную экологическую ситуацию на специалистов по промышленной экологии было бы неправильным. Все участники, задействованные в организации производственного процесса, должны отвечать за результативность решений, в том числе и экологического характера.

Принято, что все люди должны обладать экологической культурой, чтобы в своей повседневной жизни не навредить природе. Но лица, призванные в силу своего должностного положения принимать экологически значимые решения, то есть от реализации которых, зависит сохранность и состояние природных объектов и комплексов должны обладать культурой экологической безопасности. Иначе говоря, эти лица должны обладать знаниями и навыками, которые позволяют предварительно оценить в том числе и с экологической точки

зрения, на сколько безопасна реализация данного решения для природных объектов и комплексов.

Квалификационные требования – это требования кандидатам на трудоустройство на определенной должности (о наличии у них образования по соответствующей специальности (направлению подготовки), стажа работы по специальности, направлению подготовки, профессиональных знаний и умений, необходимых для исполнения должностных обязанностей в определенной области и вида деятельности).

На обеспечение квалификационных требований по наличию соответствующего образования вида образования и владению знаниями в определенных направлениях, установленных в квалификационных требованиях, должны быть направлены учебные программы по подготовке, переподготовке и повышению квалификации специалистов по промышленной экологии, да и в целом организация учебного процесса должна быть ориентирована на решение этой главной задачи.

Положения квалификационных требований специалистов по промышленной экологии соответствующим образом должны найти свое отражение должностных инструкциях, составляемых и утверждаемых на каждого работника предприятия, организации и учреждения.

Квалификационные требования специалистов по промышленной экологии состоят из следующих блоков требований:

а) наличие высшего или среднего специального профессионального образования, полученного в учреждениях образования Республики Узбекистан, либо высшего образования, полученного в образовательных учреждениях иного государства и в соответствии с законодательством, признанным в Республике Узбекистан. Наличие среднего специального профессионального образования достаточно для предприятий четвертой категории опасности;

б) для трудоустройства на должности специалистов по промышленной экологии объектов первой и второй категории экологической опасности наличие стажа работы специалистом по промышленной экологии не менее трех лет, а для претендентов на должности руководителей экологических служб, отделов и других экологических подразделений предприятий, организаций наличие стажа работы специалистом по промышленной экологии не менее пяти лет.

в) владение знаниями в следующих направлениях:

- экологическое законодательство;
- экологическая безопасность;
- общие понятия об угрозах техногенного и природного характера;
- экологические аспекты ресурсосбережения;
- адаптация к изменению климата;

- условия проектирования, размещения, строительства и реконструкции производственных объектов;
- природопользование, виды, нормирование и другие условия, разрешительная система;
- общие условия экологической экспертизы, экологического аудита;
- государственный, ведомственный, производственный и общественный экологический контроль;
- учет и мониторинг природопользования, загрязнения окружающей природной среды и другого вредного влияния на природные объекты и комплексы;
- экологическое нормирование – предельно допустимые концентрации вредных веществ, предельно допустимые нормы выбросов в атмосферный воздух и сбросов в водные объекты, лимиты размещения отходов, уровни вредного физического воздействия на атмосферный воздух;
- методы расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, оценка загрязнения атмосферного воздуха, очистные сооружения
- вредное физическое воздействие на окружающую среду, радиационное загрязнение, нормирование уровней радиационного воздействия;
- методы расчета сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, оценка загрязнения водоемов, очистка сточных вод;
- обращение отходов – нормирование образования отходов, размещение, хранение и утилизация отходов;
- условия охраны растительного и животного мира, рубка древесно-кустарниковых растений, условия сохранения среды произрастания растений и среды обитания животных
- экологические проблемы промышленности и пути их решения;
- экологические проблемы транспорта и пути их решения;
- экологические проблемы в строительстве и пути их решения;
- экологические проблемы энергетики и пути их решения;
- эколого-правовая ответственность, санкции и иные меры правового воздействия.

Вышеперечисленные квалификационные требования специалистов по промышленной экологии являются лишь примерными. Они могут уточняться в зависимости от отрасли производства в каждом конкретном случае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трудовой кодекс Республики Узбекистан : 15 мая 2007 г. № 9: принят 23 ноября 2015 г.: введен в действие 01 января 2016 № 414-V //

LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

2. Об охране природы : Закон Респ. Узбекистан от 09 декабря 1992 г. № 754-ХП : в ред. от 29 января 1993 г. // LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

3. Об охране атмосферного воздуха : Закон Респ. Узбекистан от 27 декабря 1996 г. № 353-I : в ред. от 03 января 1997 г. // LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

4. Об отходах : Закон Респ. Узбекистан от 05 апреля 2002 г. № 362-II : в ред. от 02 мая 2002 г. // LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

5. Об экологической экспертизе : Закон Респ. Узбекистан от 25 мая 2000 г. № 73-II : в ред. от 01 июля 2000 г. // LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

6. Об экологическом аудите : Закон Респ. Узбекистан от 15 марта 2021 г. № ЗРУ-678 : в ред. от 17 марта 2022 г. // LexUZ on-line: информ.-поисковая система (дата обращения: 03.01.2025).

УДК 502.3

Е.Н. Демиденко, студ.; Е.Н. Казимирская, асп.;
А.В. Лихачева, зав. кафедрой, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ВЫБОР ВАРИАНТА ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Одним из элементов экологической политики Республики Беларусь является развитие зеленой экономики. В таком случае одним из важных направлений является использование отходов в качестве вторичных материальных ресурсов.

При разработке новой технологии переработки отходов необходимо предусмотреть все источники и факторы воздействия на окружающую среду при ее реализации. Существуют разные подходы к оценке социальных, экологических, экономических последствий реализации проектируемой деятельности, но одним из наиболее перспективных подходов является оценка жизненного цикла продукта. Поэтому при обосновании выбора технологии переработки отходов необходимо рассматривать жизненный цикл производства продукции из традиционных видов сырья и из отходов.

В работе приведен сравнительный анализ жизненного цикла магнитных сорбентов, получаемых из природного и техногенного сырья. В качестве природного сырья для получения магнитных сорбен-

тов служит железная руда. Добыча железной руды оказывает значительное воздействие на окружающую среду, которое сопровождается загрязнением атмосферного воздуха, изменением ландшафтов, уничтожением местообитаний живых организмов, изменением уровня подземных вод, сбросом сточных вод, образованием отходов, а также физическим воздействием.

После извлечения руды происходит дробление и измельчение для увеличения поверхности контакта. Для увеличения содержания железа в минерале происходит обогащение руды с использованием магнитной сепарации, флотации или гравитационного разделения. На стадиях обработки минерала образуется значительное количество твердых отходов.

На сегодняшний день магнитный сорбент получают из чистых химических веществ, поэтому следующим этапом жизненного цикла в данном варианте является получение химически чистых соединений железа. Данная стадия будет характеризоваться таким воздействием на окружающую среду как загрязнение атмосферного воздуха, образование сточных вод и образование отходов.

Стадия получения магнитных сорбентов включает в себя осаждение оксидов железа из растворов, фильтрование, промывку и сушку осадка. На этой стадии происходит образование сточных вод, загрязняется атмосферный воздух [1].

В качестве альтернативного сырья для получения магнитных сорбентов являются железосодержащие отходы металлургических предприятий, например, железосодержащая пыль.

Изначально осуществляется сбор, классификация и сортировка отходов. На данной стадии происходит загрязнение атмосферного воздуха, образование отсортированных отходов непригодных для переработки, а также оказывается физическое воздействия.

Далее осуществляется получение магнитного сорбента. Эта стадия, от аналогичной в первом варианте, отличается тем, что добавляется стадия выщелачивания железа из отходов, а последующая обработка раствора, содержащего железа такая же как и в первом варианте. На этой стадии, в сравнении с первым вариантом, дополнительно происходит образование отходов.

Следующая стадия жизненного цикла в обоих рассматриваемых вариантах – это использование магнитных сорбентов и при необходимости их регенерация. Процесс использования магнитных сорбентов (материалов) включает их применение в очистке сточных вод, обезвреживании медицинских отходов, очистке воздуха, производстве и разработке лекарственных препаратов.

Магнитные сорбенты могут быть регенерированы путем обработки химическими веществами, термической и электрохимической обработки для восстановления их адсорбционных свойств.

После длительного применения магнитных сорбентов и многократной их регенерации, они теряют свою эффективность, подвергаются физическому износу и становятся непригодными для использования. В связи с этим необходимо предусмотреть переработку отработанных магнитных сорбентов. Учитывая то, что по своему химическому составу они представляют собой смешанный оксид железа (II, III), то их можно применять в других отраслях промышленности, например, в металлургической.

Таким образом, как видно из представленной характеристики, стадии жизненного цикла при производстве магнитных сорбентов из природного сырья это:

- добыча железной руды,
- обогащение руды,
- получение химически чистых веществ,
- получение магнитных сорбентов,
- использование и утилизация отработанных магнитных сорбентов.

Если же рассматривать вариант получения магнитных сорбентов из железосодержащих отходов, то стадии жизненного цикла следующие:

- сбор, классификация, сортировка отходов,
- получение магнитных сорбентов,
- использование и утилизация отработанных магнитных сорбентов.

Получение магнитных сорбентов из природного сырья имеет более длинную цепочку жизненного цикла, характеризующейся большим воздействием на окружающую среду.

Выполненная экспертная оценка воздействия на окружающую среду магнитных сорбентов по стадиям жизненного цикла по обоим вариантам, позволила сравнить степень их воздействия на окружающую среду. Оценка проводилась по пятибалльной шкале, в которой 1 балл означал очень слабое воздействие, 5 баллов – очень сильное воздействие. По результатам оценки всех факторов воздействия на каждом этапе жизненного цикла было установлено, что воздействие на окружающую среду жизненного цикла магнитных сорбентов, полученных из природного сырья, составило 57 баллов, а из отходов производства – 41 балл.

Таким образом, оценку жизненного цикла продукта целесообразно использовать для сравнительного анализа разных способов производства продукции и для выбора варианта технологических решений по переработке отходов производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казимирская Е.Н., Лихачева А.В. Производственные отходы как сырьевой ресурс для получения магнитных сорбентов // Химия и жизнь. Сборник статей XXI Международной научно-практической студенческой конференции. Новосибирск, 2022. – С. 322-324.

УДК 628.3

К.Д. Ковалева, студ.;
А.В. Лихачева, зав. кафедрой, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

ФОТОКАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД

Фотохимические реакции играют важную роль в процессах, протекающих в природной среде. Это послужили толчком для развития так фотохимических технологий очистки сточных вод, которые сочетают высокую эффективность в мягких условиях и безопасность для окружающей среды. Основу таких технологий составляют фото-каталитическое окисление органических веществ в воде.

Фотокатализаторы, в присутствии которых протекают фотокаталитические реакции, определяются как материалы, которые разлагают вредные вещества под воздействием солнечного света, содержащего УФ-лучи.

В литературе в качестве фотокатализаторов используются несколько полупроводниковых материалов, наиболее распространенными из которых являются оксиды (TiO_2 , Fe_2O_3 , SnO_2 , ZnO , ZrO_2 , CeO_2 , WO_3 , V_2O_5 и т. д.).

В настоящее время среди фотокаталитических процессов окисления наибольшей популярностью пользуются реакции, протекающие на гетерогенных катализаторах на основе диоксида титана.

Установлено, что диоксид титана видимый свет не поглощает, поэтому его эффективное действие наблюдается только под действием ультрафиолетового света. Поэтому в данных процессах может быть использована только малая часть солнечного излучения, достигающего земной поверхности. Однако практический интерес заключается в фотокаталитических реакциях, использующих в качестве источника

энергии именно солнечное излучение, т.е. видимый свет.

Фотокатализаторы на основе оксидов железа, проявляющие полупроводниковые свойства с узкой шириной запрещенной зоны, показывают лучшие результаты в видимом диапазоне. Но фотоактивность оксида железа распространяется только на органические молекулы, обладающие сильными восстановительными или комплексообразующими свойствами.

Основная цель настоящей работы заключалась в получении и изучении свойств железосодержащих фотокатализаторов окисления органических веществ в воде.

Выполнение работы предусматривало:

- обоснование выбора варианта получения фотокатализатора из отходов (на примере железосодержащей пыли);
- определение оптимальных технологических параметров получения фотокатализатора;
- определение активности фотокатализатора в процессах очистки воды от органических загрязнителей.

В качестве сырьевого ресурса для получения фотокатализатора рассматривался отход литейного производства, который на данный момент не перерабатывается: железосодержащая пыль без вредных примесей. Данный отход образуется в процессе обрубки и очистки деталей литейного производства. В состав железосодержащей пыли входят: Fe_2O_3 (50-70%), Fe_3O_4 (10-30%), металлическое железо (5-15%), SiO_2 (5-15%), CaO (до 5%) и MgO (до 3%). Пробы отхода, отбирались для проведения исследований на ОАО «Минский тракторный завод», на котором его образуется ежегодно 3614,6 тонн.

В соответствии с Классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь [1], имеется следующая информация о данном отходе:

Блок 3. Отходы минерального происхождения.

Раздел 5. Отходы металлов и их сплавов.

Группа 1. Лом и отходы черных металлов.

Код отхода: 3510101.

Наименование отхода: Железосодержащая пыль без вредных примесей.

Степень опасности и класс опасности: четвертый класс.

Код вида отхода по классификации Базельской конвенции о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением от 22 марта 1989 г.: Y17 (Отходы обработки металлических и пластмассовых поверхностей) [2].

Код отхода по решению Совета 2000/532/ЕС: 120102 (наимено-

вание отхода: пыль и частицы черных металлов. Группа: Отходы формовки и физической и механической поверхностной обработки металлов и пластмасс) [3].

На первом этапе исследований определяли оптимальные параметры выщелачивания железа из отхода азотной кислотой. Выщелачивание железа проводили азотной кислотой так как для дальнейшего синтеза фотокатализатора необходимо, чтобы железо находилось в нитратной форме. В ходе исследований установили, что для этого необходима 25% раствор азотной кислоты, соотношение отход : кислота – 1:10, продолжительность обработки 37 минут.

Синтез фотокатализатора осуществляли методом сжигания растворов в присутствии в качестве топлива одного из следующих веществ: глюкоза, сахароза, мочевины, лимонная кислота.

В ходе исследований установлено, что основные технологические параметры получения фотокатализаторов следующие:

- тип топлива – глюкоза;
- соотношение топливо : $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ – 1:1;
- температура – 400°C ;
- время – 30 минут.

Исследование процессов фотокаталитической очистки сточных вод с использованием полученных фотокатализаторов проводили на модельных сточных водах, содержащих красители. Эффективность очистки составила 78 %. Для увеличения эффективности очистки сточных вод исследования будут продолжены в направлении определения оптимальных параметров процесса, а также использования комбинированных методов очистки сточных вод: фотохимического и химического.

ЛИТЕРАТУРА

1. Общегосударственный классификатор Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь». Утвержден и введен в действие постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды от 9 сентября 2019 г. № 3-Т. (дата доступа: 18.01.2025)

2. Базельская Конвенция «О контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением». Протокол об ответственности и компенсации за ущерб, причиненный в результате трансграничной перевозки опасных отходов и их удаления. – ЮНЕП. – 141 с.

3. Информационно-правовой портал ГАРАНТ.РУ. Решение Европейской Комиссии 2000/532/ЕС. – 41 с.

УДК 543.3

Н.А. Бочко, учаш. (УО «Национальный детский технопарк», г. Минск);
А.В. Лихачева, зав. кафедрой, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД МИНСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Мониторинг подземных вод является одним из видов функционирующих в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. При этом объектами наблюдения являются грунтовые и артезианские подземные воды, а пунктами наблюдений – наблюдательные скважины или группа скважин (гидро-геологические посты), оборудованные на различные водоносные горизонты (комплексы).

Актуальность этих работ обусловлена определяющей ролью подземных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении республики. Кроме того, данные о естественном состоянии подземных вод используются при соблюдении Международных меморандумов о сотрудничестве в области охраны и рационального использования подземных вод (в т.ч. трансграничных водных объектов); при подготовке отчетности в соответствии с Конвенцией по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер – для расчета показателя достижения целей устойчивого развития ЦУР 6.5.2 «Доля площади трансграничного водного бассейна, в отношении которой имеется действующий механизм трансграничного сотрудничества»; при разработке Планов управления речными бассейнами в части раздела «Подземные воды» [1].

Объектами исследования в данной работе являлись подземные воды, разгружающиеся в виде родников на территории Минской агломерации.

Количество выходов подземных вод на поверхность очень большое, но нами были изучены воды только четырех источников: в д. Витовка; в д. Рогово; в д. Птичь; в г. Минске (Свято-Елисаветинский монастырь).

Выбор этих источников был обусловлен их местоположением:

- источники в д. Витовка, д. Рогово, д. Птичь находятся в местах относительно удаленных от промышленных источников загрязнения окружающей среды;

- для сравнения источник в Свято-Елисаветинском монастыре расположен в г. Минске, т.е. в зоне интенсивного антропогенного воздействия.

Территориально источники расположены в западной, северо-западной и северной части Минской агломерации на расстоянии от

центра г. Минска от 17 до 31 км, а от МКАД – 7-22 км.

Анализ проб проводился по:

– Органолептическим показателям качествам воды, таким как: запах, вкус (привкус), мутность, цветность.

– Химическим показателям, которые в свою очередь подразделяются на:

I. обобщенные показатели качества воды: минерализация, жесткость, перманганатная окисляемость, реакция среды (рН);

II. индивидуальные показатели качества воды, которые делятся ещё на две группы:

1) катионы (NH_4^+ ; Mg^{2+} ; Ca^{2+} , тяжелые металлы: Cu^{2+} ; $\text{Fe}_{\text{общ}}$; Fe^{3+} ; Fe^{2+});

2) анионы (F^- ; Cl^- ; SO_4^{2-} ; NO_3^- ; CO_3^{2-} ; HCO_3^-).

При выполнении работы применяли как визуальные методы анализа, так и физико-химические. Так, фотоколориметрический метод применяли для определения концентрации железа в воде; турбидиметрический – концентрации сульфатов; ионометрический – рН, концентрации ионов аммония, содержания фторидов, хлоридов, нитратов; титриметрический – определение жесткости, перманганатной окисляемости, концентрации кальция, магния, меди, карбонатов; гравиметрический – определение минерализации воды.

Все пробы воды по органолептическим показателям соответствовали требованиям, предъявляемым к воде питьевого качества, т.к. характеризовались отсутствием осязаемого запаха, вкуса и привкуса. Вода была прозрачной и бесцветной. Результаты анализа проб воды по обобщенным показателям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа проб воды по обобщенным показателям

Место отбора пробы	Минерализация, мг/л	Жесткость, °Ж	рН, единицы рН	Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /л
Источник на р. Птичь	344	6,32	7,77	ниже предела обнаружения данным методом
Источник в д. Рогово	410	10,26	7,87	1,34
Источник в д. Витовка	280	6,32	7,77	1,74
Источник в г. Минске	428	9,47	7,77	1,74
Норматив	1000	1,5-7	6-9	5

Как следует из представленных данных, по обобщенным химическим показателям воды из исследуемых источников соответствуют требованиям, предъявляемым к воде питьевого качества, за исключением показателя жесткости воды.

В таблице 2 приведены результаты анализа проб воды по неорганическим веществам (анионы). Полученные результаты свидетельствуют о том, что все воды имеют повышенную щелочность и высокую карбонатную жесткость.

В таблице 3 приведены результаты анализа проб воды по неорганическим веществам (катионы). Превышение нормы (показателя физиологической полноценности макро- и микроэлементного состава питьевой воды) содержания ионов магния наблюдается во всех пробах. Это подтверждает высокую жесткость вод в данных источниках.

Таблица 2 – Результаты анализа проб воды по неорганическим веществам (анионы)

Место отбора пробы	Концентрация, мг/л					
	фториды	хлориды	сульфаты	нитраты	карбонаты	бикарбонаты
Источник на р.Птичь	1,26	186,31	12,25	19,92	ниже предела обнаружения	396,5
Источник в д. Рогово	0,99	154,96	10,1	31,07	ниже предела обнаружения	402,6
Источник в д. Витовка	0,89	38,92	5,05	3,33	ниже предела обнаружения	498,7
Источник в г. Минске	0,81	46,8	5,05	34,87	ниже предела обнаружения	390,9
Норматив	0,5-1,5	350	500	45		30-400

Таблица 3 – Результаты анализа проб воды по неорганическим веществам (катионы)

Место отбора пробы	Концентрация, мг/л					
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cu ²⁺	Fe _{общ}	Fe ³⁺
Источник на р.Птичь	76,8	48	0,359	ниже предела обнаружения	0,045	ниже предела обнаружения
Источник в д. Рогово	124,8	96	0,285	ниже предела обнаружения	0,318	ниже предела обнаружения
Источник в д. Витовка	76,8	48	0,266	ниже предела обнаружения	ниже предела обнаружения	ниже предела обнаружения
Источник в г. Минске	115,2	128	0,485	ниже предела обнаружения	0,41	0,12
Норматив	5-65	25-130	1	1	0,3	

Высокое содержание железа свойственно для подземных вод Республики Беларусь. Превышение предельно допустимой концентрации железа наблюдалось в пробах воды, отобранных в источниках д. Рогово и г. Минска. Поэтому пробы воды из данных источников могут иметь незначительные отклонения по цвету и привкусу. Однако, надо отметить, что по нормативам, установленным ВОЗ, допустимая концентрация железа в воде составляет 2 мг/л. Эта величина нормирует токсическое воздействие железа на организм человека. Данный норматив в исследуемых водах не превышен.

Превышение ПДК в данных пробах вероятнее всего связано с системой отведения воды потребителю: металлические трубы, желоба.

Таким образом, анализ качества подземных вод, разгружающиеся в виде родников на территории Минской агломерации, свидетельствует о пригодности воды для питьевого использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Подземные воды [Электронный ресурс] : [сайт]. [2025]. URL: <https://nsmos.by/sites/default/files/2024-06/3-monitoring-podzemnykh-vod.pdf>.

УДК 622.882

В.Д. Зотова, Д.Д. Булич, учащ.

(УО «Национальный детский технопарк», г. Минск);

А.В. Лихачева, зав. кафедрой, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕКУЛЬТИВАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Большая часть населения земного шара уже в настоящее время живет в окружении техногенных ландшафтов, они же энергично используются для нужд рекреации и массового кратковременного туризма – так называемые пригородные зоны. Свойственные им измененные биотические системы и сложные инженерно-технические структуры создают постоянную среду жизни людей. Но большинство техногенных ландшафтов в настоящем их состоянии явно неблагоприятны и даже опасны для здоровья человека. Кроме того, все техногенные ландшафты из-за низкой биологической продуктивности и специфических биофизических и биохимических свойств образуют своеобразные провалы и барьеры на путях миграции веществ и энергии. Они искажают нормальный ход таких фундаментальных процессов, протекающих в биосфере, как биологический круговорот азота, газовый режим атмосферы и т. п., снижают их интенсивность [1].

Характерной чертой их является нарушение целостности и сплошности «области жизни» в биосфере, вплоть до полного уничтожения почвенного и растительного покровов в результате деятельности человека, сравнимой по значимости с геологическими процессами. Среди техногенных ландшафтов особое место по своему отрицательному воздействию на естественные природные комплексы (да и на здоровье человека) занимают так называемые промышленные от-

валы и отработанные карьеры. Они концентрируются в окрестностях большинства населенных пунктов и всех крупных городов [1].

Заброшенные внутрихозяйственные и промышленные карьеры зачастую превращаются в бросовые земли, свалки, полигоны ТКО. Они загрязняют почву, грунтовые воды, воздух. Восстановление и повторное вовлечение в оборот таких участков требует больших затрат. Поэтому более рациональным является принятие мер, которые помогут предотвратить такие ситуации.

Для нашей республики важной и нерешенной на сегодняшний день остается проблема обращения с отработанными карьерами.

В Республике Беларусь организована работа по рекультивации отработанных карьеров. Вместе с тем принимаемых мер недостаточно. Землепользователями регулярно допускаются нарушения условий разработки полезных ископаемых для внутрихозяйственных нужд, выявляются несанкционированные свалки отходов во внутрихозяйственных карьерах, границы карьеров не обозначаются на местности, не устанавливаются информационные знаки о принадлежности карьеров.

На сегодняшний день основная задача исследовательских, опытно-производственных и производственных работ по рекультивации – устранить негативное воздействие нарушенных ландшафтов на прилегающие территории, вернуть им биологическую и социально-экономическую ценность.

Нарушенные земли в результате промышленной деятельности человека должны восстанавливаться своевременно и с надлежащим качеством. Проведение восстановительных работ способствует более быстрой интеграции нарушенных земель в природную среду.

Многие нарушенные земли, существующие до настоящего времени – это результат хозяйственной деятельности прошлых лет, отражающий как рост промышленного производства, так и уровень общественной ответственности за масштабы негативных последствий, вызванных антропогенной деятельностью.

В зависимости от антропогенных воздействий нарушенные земли образуются в ходе:

- добычи торфа: фрезерные поля, карьеры гидроторфа, машиноформовочные карьеры;
- добыче нерудных строительных материалов: карьеры песка, глины, песчано-гравийных материалов;
- производства открытых горных работ: карьерные выемки, внутренние и внешние отвалы;
- производства подземных разработок: провалы, прогибы, шахтные отвалы (терриконы);

- функционирования урбанизированных территорий: золоотвалы, шлакоотвалы, шламонакопители, полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) и др.;
- проведения разведочных и изыскательских работ: участки земель с нарушенным растительным и почвенным покровом, а также участки земель, загрязненные нефтью и нефтепродуктами;
- выполнения строительных и эксплуатационных работ: участки земель с частично или полностью нарушенным растительным и почвенным покровом, территории земель, подвергающиеся подтоплению, затоплению и эрозионным процессам, а также насыпи, кавальеры, отвалы, гидроотвалы и др.;
- технологических процессов при получении материалов, веществ, электрической энергии: земли, загрязненные аэрозолями и пылевыми выбросами, органическими и неорганическими веществами, радиоактивными элементами;
- сельскохозяйственного производства: земли, загрязненные остаточным количеством пестицидов, дефолиантов, сточными водами и удобрениями, а также засоленные, эродированные и малопродуктивные земли;
- военных действий, производства оружия и его основ: земли, загрязненные радиоактивными, отравляющими, токсичными органическими и неорганическими веществами, опасными бактериологическими компонентами.

Мировой опыт по рекультивации земель насчитывает всего около 100 лет. Первоначально рекультивация развивалась как составная часть мелиорации земель и была направлена на восстановление продуктивности нарушенных земель в результате открытого и отчасти закрытого способа добычи ископаемых. Нарушенные земли делились на две группы. Первая – земли с насыпанным грунтом (промышленные отходы, отвалы подземных горных разработок). Вторая – земли, разрушенные в результате добычи ископаемых открытым способом (карьеры, отвалы при открытых работах, провалы на месте разработок). Основная часть разрушенных земель приходилась на выработки полезных ископаемых открытым способом.

Научные исследования по рекультивации земель сформировались в самостоятельную отрасль научных знаний, объектом изучения которых является сложная эколого-хозяйственная система «человек – землеразрушающие технологии – природа» [2].

Но помимо вышеуказанных двух групп выявилась и третья группа земель требующих рекультивации: это земли, нарушенные не землеразрушающими технологиями, а самой природой (водной эрози-

ей и оползнями). Эта группа, в силу своей специфики, занимает обособленное место среди нарушенных земель.

В настоящее время рекультивация сложилась как объект специальной научно-технической дисциплины, как самостоятельная структура проблемы охраны окружающей среды и, в первую очередь, охраны почв. Несмотря на достигнутые успехи в теоретическом и практическом плане, в рекультивации нарушенных земель, как и в любой новой проблеме, много нерешенных вопросов. Среди них и неопределенность относительно этапов проведения работ. Оформившееся первоначальное положение о двух этапах рекультивации земель, техническом (горнотехническом) и биологическом, не в полной мере отражает сложившуюся реальную ситуацию, тем самым представляя некоторую преграду в развитии технологии выполнения работ.

В общих чертах процесс должен проходить в следующей последовательности: подготовительный период – подготовка проектно-сметной документации – производство работ – заключительный этап.

Немаловажным является и экономический вопрос проведения рекультивации. В настоящее время площадь рекультивированных земель составляет около одной трети общей площади нарушенных земель. Масштабы рекультивации быстро растут. В связи с этим заметно увеличиваются и расходы на рекультивацию. Однако и в настоящее время они не компенсируют всех потерь от снижения плодородия. Затраты составляют лишь одну треть ущерба от снижения прибыли за период восстановления почвенного плодородия.

Необходимость ускоренной и качественной рекультивации нарушенных земель обуславливается как требованиями улучшения санитарно-гигиенических условий и охраны окружающей среды, так и финансовыми интересами предприятий с учетом платы за размещение отходов и землепользование. Для того чтобы эффективно проводить рекультивационные работы в Республике Беларусь необходимо использовать весь положительный опыт других стран по этой проблеме и применить его в белорусских условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1 Чибрик, Т.С. Основы биологической рекультивации: учебное пособие / Т.С. Чибрик. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2002. – 172 с.

2 Рекультивация нарушенных земель // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Рекультивация земель в СССР», Санкт-Петербург, 23-25 июня 2005 г. – СПб, 2005. – 239 с.

А.Н. Дашкевич, преп.-стажер;
А.В. Лихачева, зав. кафедрой, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ТЕХНОЛОГИЯ БИОКОМПОСТИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

При производстве парфюмерно-косметической продукции на основе экстрактов из растительного сырья образуются многокомпонентные отходы, которые не используются и вывозятся на объекты захоронения отходов. Переработка таких отходов затруднена из-за содержания в них экстрагирующих веществ.

Процесс биокomпостирования представляет собой сложное взаимодействие между органическими отходами, микроорганизмами, влагой и кислородом.

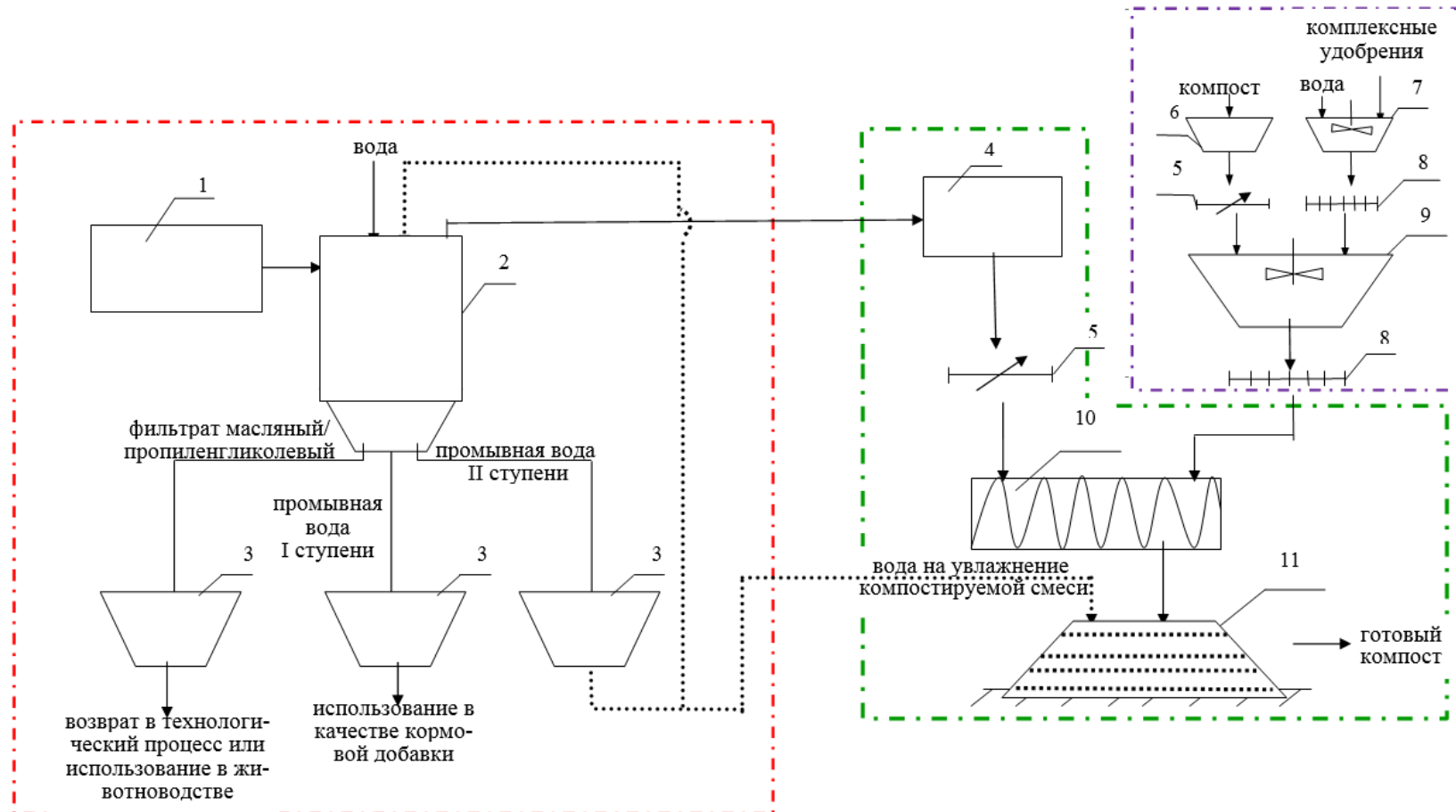
Исходя из результатов лабораторных исследований, отходы необходимо подготавливать к биокomпостированию, для этого предусматривается дополнительное удаление из них экстрагирующих веществ и последующая промывка в нутч-фильтре.

Технологическая схема процесса биокomпостирования отходов представлена на рис. 1.

Достоинствами использования нутч-фильтра является возможность тщательной промывки отхода, легкость защиты от коррозии, простота и надежность устройства. Образовавшиеся пропиленгликолевые и масляные фильтраты могут быть возвращены в технологический процесс производства парфюмерно-косметической продукции или использованы в качестве кормовой добавки в сельском хозяйстве. Благодаря пропиленгликолю животные лучше усваивают из рациона жир и белок, а растительное масло имеет высокую кормовую ценность.

Следующим этапом в случае содержания пропиленгликоля в отходах, является промывка водой, так как пропиленгликоль хорошо растворяется в воде. Промывная вода после II ступени промывки будет использоваться для промывки отходов на I ступени, а также для увлажнения компостируемой смеси при компостировании. Промывная вода после I ступени промывки будет использоваться в качестве кормовой добавки.

Применяемая в технологии площадка для компостирования представляет собой прямоугольный участок земли, который предварительно асфальтируется и на котором формируются компостные бурты.



1 – емкость для временного хранения отходов; 2 – нутч-фильтр; 3 – сборник; 4 – накопительная ёмкость; 5 – весовой дозатор; 6 – емкость для хранения компоста; 7 – емкость для приготовления комплексных удобрений; 8 – объемный дозатор; 9 – емкость для приготовления ускорителя; 10 – смеситель; 11 – площадка для биокомпостирования

Рисунок 1 – Технологическая схема процесса биокомпостирования отходов

Компостные гряды сверху укрываются землей или готовым компостом для предотвращения распространения неприятного запаха и пересыхания компостируемой смеси.

В процессе компостирования должны соблюдаться следующие параметры: влажность 60%; pH компостируемой смеси 6,5-8,0; температурный режим; перемешивание через каждые две недели.

По результатам выполненных исследований, установлено, что для компостирования отходов растительного сырья необходимо использовать ускоритель. Приготовление, которого предусматривает использование зрелого компоста.

Зрелый компост из емкости 6 с помощью весового дозатора 5 поступает в емкость для приготовления ускорителя 9 куда также при помощи дозатора 8 подается раствор комплексных удобрений, приготовленный в емкости 7. Соотношение компост : комплексные удобрения составляет 1 : 10. Время обработки компоста раствором комплексных удобрений составляет трое суток. После чего полученный ускоритель при помощи дозатора 8 поступает в смеситель 10 для приготовления компостируемой смеси, где смешивается с подготовленным отходом.

Подготовка отхода растительного сырья предусматривает удаление масляного или пропиленгликолевого экстракта а нутч-фильтре 2, с последующей его двухступенчатой промывкой водой.

Подготовленный отход из нутч-фильтра собирается в емкости 4, а затем дозировано поступает в смеситель 10 где смешивается с ускорителем компостирования в соотношении 10:1. Подготовленная компостируемая смесь формуется в бурты на площадке для компостирования. Для обогащения компостируемой смеси кислородом производится перемешивание один раз в две недели. Для создания благоприятных условий для естественной аэрации компостируемой смеси размеры буртов: высота 1,5 м и ширина 2,5 м. В процессе компостирования влажность компостируемой смеси поддерживается 50-60%. При необходимости используют искусственные увлажнители. Продолжительность компостирования составляет 90 суток.

Готовый компост может быть использован в качестве почвоулучшающей добавки, почвогрунта и удобрения в сельском хозяйстве, зеленом строительстве, при рекультивации земель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессмертная М.С. Интенсификация процесса биокомпостирования осадков сточных вод / М.С. Бессмертная, А.В. Лихачева // Биотехно-

логия: взгляд в будущее. Материалы II международной студенческой научно-практической конференции, 2016. С. 170-173.

2. Лихачева А.В. Использование биodeградированной древесины для интенсификации компостирования отходов / Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства // сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ. Издательство: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Краснодар). 2017. С. 452-454.

УДК 635.82

Ю.Г. Янута, зам. директора, канд. техн. наук;
М.А. Шелоник, мл. науч. сотр.

(Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск);
Г.Г. Янута, начальник научного отдела, канд. биол. наук
(ГПУ «Национальный парк «Припятский»)

ОТРАБОТАННЫЙ СУБСТРАТ ВЫРАЩИВАНИЯ ШАМПИНЬОНОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ВЕРМИКОМПОСТИРОВАНИЯ

Грибы представляют собой ценный пищевой продукт, спрос на который каждый год растет. Согласно [1], в 2023 году мировой рынок грибов в натуральном исчислении оценивался на уровне 50 млн. т. На долю шампиньонов приходится около 60 % от общей массы произведенных плодовых тел, что составляет 30 млн. т. С учетом того, что при производстве 1 кг плодовых тел шампиньонов образуется приблизительно 5 кг отработанного грибного субстрата (ОГС), годовой объем ОГС можно оценить на уровне 150 млн. т. В Республике Беларусь согласно [2], за 2024 год было произведено более 29 тыс. т. шампиньонов, что привело к образованию отработанного субстрата в количестве более 145 тыс. т.

Данный материал в настоящее время не перерабатывается и, как правило, передается сельскохозяйственным предприятиям. При этом до передачи он подвергается термической обработке. Ввиду наличия большого количества органических компонентов в отработанном субстрате, места накопления данного материала можно рассматривать как источник потенциального размножения патогенных микроорганизмов, насекомых, выделения неприятных запахов, загрязнения подземных вод.

В этой связи представляется актуальным изучить состав отработанного субстрата и предложить эффективный способ его переработки. Исследователи разных стран активно разрабатывают способы переработки ОГС. Наиболее распространенным способом обращения с ОГС является размещение их на полигонах твердых коммунальных отходов, сжигание или передача на сельскохозяйственные предприятия для внесения в землю в виде органической мульчи. В производстве энергии ОГС не является общепринятым сырьем, а применение его в качестве материала для биоремедиации территорий, сырья для биотехнологической переработки и биомедицины не позволяют переработать образующиеся уже в настоящий момент объемы. Одним из методов обращения с ОГС может быть его переработка с помощью вермитехнологий.

Вермитехнология – комплекс мероприятий, в ходе которых культура технических дождевых червей используется для переработки отходов, и одновременно получения новых продуктов. Вермитехнология относится к биологическим способам переработки органических отходов (биоконверсия). Положительным моментом использования такого рода технологий является то, что при переработке материала образуется два ценных компонента: биогумус и органическая биомасса червей. Известно, что из 1 т субстрата после вермикомпостирования получают до 600 кг биогумуса и около 100 кг биомассы червей.

На сегодняшний день способ переработки органических отходов с помощью вермитехнологий широко применяется во многих странах, особенно в США, Канаде, Китае, Индии и др.

Вермитехнологию условно разделяют на два биотехнологических направления: вермикультивирование и вермикомпостирование [3]. Вермикультивирование, в большей степени, ориентировано на интенсифицированное производство биомассы червей с целью их последующего применения в качестве кормовой добавки в животноводческих и рыбных хозяйствах. Вермикомпостирование, наоборот, сосредоточено на переработке различных отходов и получении продукта, обогащенного экскрементами червей (копролитами) – вермикомпоста или биогумуса [4].

Преимущество вермитехнологий заключается в том, что они позволяют в едином технологическом процессе при сравнительно малых затратах перерабатывать в больших количествах практически любые органические отходы с получением конечных продуктов: высокоэффективного органического удобрения – биогумуса (вермикомпоста) и полноценного биологического белка, используемого в животноводстве.

При проведении эксперимента по оценке эффективности применения вермикюльтивирования использовали красного калифорнийского червя рода *Eisenia*. Масса подсаживаемых в субстрат червей составила 5 г. Все особи были неполовозрелые (отсутствовал поясok в передней трети животного). Это связано с тем, что такие особи легче адаптируются к различным типам субстрата. Маточное поголовье выращивали на субстрате из перепрелой листвы.

Заселение проводилось на следующие виды субстрата: листва перепревшая (контроль); ОГС; ОГС + 10 % речного песка (ОГС + 10% РП); ОГС + 10 % листвы + 10% речного песка (ОГС + 10 % Л + 10 % РП). Червей помещали в экспериментальные субстраты с 50 г навески исходного материала, где они развивались до этого.

Исходная масса заселяемого субстрата составляла 3 кг, влажность – 65%. Смачивали субстрат по мере его высыхания. Замер биомассы червей производили каждые 7 дней. Отдельно фиксировали появление поясков у червей, что свидетельствовало о начале полового размножения. В таблице представлены результаты развития червей на экспериментальных субстратах.

Таблица – Развитие пояска на червях в зависимости от состава субстрата

Характеристики субстрата	7 дней	14 дней	21 дней	28 дней	35 дней	42 дней	49 дней
Контроль	П	+	+	+	+	+	+
ОГС	–	–	П	–	–	–	+
ОГС + 10 % РП	–	П	–	+	+	+	+
ОГС + 10 % Л + 10 % РП	П	–	+	+	+	+	+

Примечание. П-переход червей из исходного субстрата.

Развитие пояска на теле червя является косвенным признаком качества субстрата для вермикюльтивирования. В контрольном субстрате наблюдали быстрое формирование пояска, что может быть обусловлено «знакомством» вида с данным типом корма. Для субстрата ОГС +10% Л + 10 % РП наблюдали быстрый переход из исходного в модельный субстрат. При этом отсутствие пояска после перехода обусловлено адаптацией организма к новому типу субстрата.

Данную закономерность наблюдали для всех «новых» субстратов. На рис. 1 представлена динамика биомассы червей в зависимости от состава субстрата.

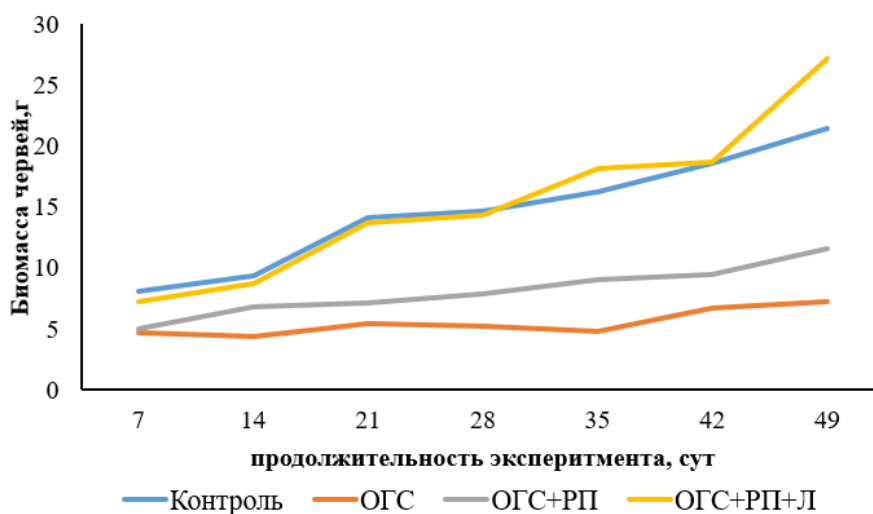


Рисунок 1 – Динамика биомассы червей в модельных субстратах

Динамика биомассы червей для субстратов контрольный и ОГС + 10 % Л + 10 % РП схожа. Некоторое замедление в развитии пояса вероятно обусловлено большим временем, необходимым для адаптации к новому виду субстрата.

Таким образом, установлено, что ОГС может являться компонентом для создания на его основе смеси для вермикомпостирования. При этом показано, что ОГС без добавок малопригоден для целей вермикомпостирования. В качестве добавок нужно вводить минеральный компонент (РП) и растительные остатки, к примеру перепревшую листву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибной дождь [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZyTSi9n6b2RP6pAe> (дата обращения 20.01.2025)
2. Объем производства культивируемых грибов [Электронный ресурс]. <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10205100042> (дата обращения: 20.01.2025)
3. Максимова С.Л. Развитие технологии вермикомпостирования и вермикультивирования в Беларуси // Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук. 2008. С. 44-47.
4. Ahmad, A. Vermicomposting by Bio-Recycling of Animal and Plant Waste: A Review on the Miracle of Nature / A. Ahmad [ets.] // Journal of Innovative Sciences. 2022. Vol. 8, № 2. P. 175–187

СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ухудшение качества воды в природных источниках вызывает необходимость реализации комплекса природоохранных мероприятий, направленных на снижение поступления загрязняющих веществ в водные экосистемы. Учитывая сложную взаимосвязь процессов распространения химических веществ в компонентах окружающей среды, указанные мероприятия затрагивают различные аспекты хозяйственной деятельности человека и направлены на снижение количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в водоемы, массы отходов, подлежащих захоронению. В Республике Беларусь совокупные расходы на охрану окружающей среды в 2022 году составили 1183,5 млн. рублей. При этом затраты, связанные с совершенствованием системы обращения со сточными водами, составили 546,0 млн. рублей, с отходами – 346,4 млн. рублей, а затраты, направленные на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата, – 212,6 млн. рублей [1].

Одним из направлений, позволяющих снизить поступление загрязняющих веществ в водные объекты, является совершенствование системы очистки сточных вод. Это вызывает необходимость поиска новых методов очистки или повышение эффективности существующих систем очистки сточных вод за счет совершенствования конструкций очистного оборудования, применения новых реагентов или материалов, используемых в процессе очистки (коагулянтов, флокулянтов, катализаторов, сорбентов и т.п.). В зависимости от вида загрязняющих веществ и степени загрязнения вод применяют различные способы очистки. Для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод применяют химические, электрохимические, сорбционные и иные методы очистки стоков.

В работе проведены исследования, направленные на изучение возможности применения в процессах очистки сточных вод от ионов меди в качестве сорбента частиц древесной золы, образующейся при сжигании отходов древесины на одном из теплоэнергетических объектов Республики Беларусь и уловленной на газоочистной установке.

В соответствии с ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» [2] используемый в работе отход име-

ет код 3130100 и называется «зола и пыль (летучие) топочных установок». Указанный отход имеет 3 класс опасности.

Целью работы является изучение сорбционных свойств древесной золы в динамических условиях.

Исследования проводили на модельных сточных водах, содержащих ионы меди в концентрации $0,5 \text{ г/дм}^3$. Взвешенную на аналитических весах навеску древесной золы помещали в колонну. Слой сорбционного материала смачивали дистиллированной водой. Через слой сорбента пропускали сточные воды, содержащие ионы меди. В растворе (фильтрате), прошедшем сорбционный слой, проводили определение содержания ионов меди титриметрическим методом [3]. Расчет сорбционной емкости проводили, используя концентрации ионов меди до и после прохождения порции сточных вод через колонну.

Результаты исследования сорбционных свойств древесной золы представлены в таблице.

Таблица – Сорбционная емкость древесной золы в динамических условиях

Объем раствора, прошедший через колонну, см^3	Концентрация ионов меди в фильтрате, мг/дм^3	Сорбционная емкость древесной золы, мг/г
5	0	1,000
10	0	1,000
15	0	1,000
20	0	1,000
25	6,0	0,988
30	7,0	0,986
35	7,4	0,985
40	8,4	0,983

Из представленных результатов видно, что только в пятой порции фильтрата обнаруживаются ионы меди, что свидетельствует о «проскоке» ионов металла через слой сорбента. Дальнейшее пропускание раствора, содержащего ионы меди, приводит к повышению концентрации ионов металла в фильтрате.

Наблюдаемые в опыте процессы соответствуют известным представлениям о сорбции загрязняющих веществ в динамических условиях. Так, по мере пропускания раствора через колонну в ней образуется сорбционный слой. В верхней части колонны фиксируется насыщение сорбента. Затем фронт сорбции передвигается вниз по колонне. Когда сорбционный фронт достигает нижней границы слоя сорбента, наступает

«проскок» по сорбируемому веществу. В этот момент сорбируемый ион появляется в фильтрате.

Дальнейшее пропускание сточных вод через колонну приводит к тому, что по всей высоте слоя сорбента достигается полное насыщение сорбируемым веществом. С этого времени концентрации сорбируемого иона в фильтрате и в исходном растворе будут равны [4].

На основании результатов исследований был произведен расчет динамической емкости исследуемого сорбента. Установлено, что динамическая емкость древесной золы в указанных выше условиях составляет 1 мг/г. Результаты исследований свидетельствуют о том, что древесная зола может использоваться в качестве сорбционного материала, который может найти применение в процессах очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Данный сорбент в процессах сорбционной очистки сточных вод может использоваться однократно, поскольку регенерация его часто применяемыми химическими (путем обработки отработанного сорбционного материала растворами специально подобранных химических веществ, селективно извлекающих сорбированные ионы) или термическими методами (путем сжигания органических веществ, присутствующих в составе сорбента) затруднительна. Это является недостатком древесной золы по сравнению с другими сорбционными материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник // Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/38b/0zivld0r04aj7eajlmczbajh3me35tfj.pdf> – Дата доступа: 15.01.2025.

2. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p&p1=1>. – Дата доступа: 14.01.2025.

3. Лихачева, А.В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студ. / А.В. Лихачева, Л.А. Шибека. – Минск: БГТУ, 2011. – 204 с.

4. Комиссаренков, А.А. Сорбционные технологии. определение свойств сорбентов: учеб.-метод. пособие / А.А. Комиссаренков, О.В. Федорова. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2015. – 44 с.

ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА В КОМПОСТ

Наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения, интенсивное использование земельных угодий для осуществления сельскохозяйственной деятельности, а также другие виды воздействий на компоненты окружающей среды обострили проблему деградации почв. На территории Республики Беларусь выделяют около 20 видов деградации земель. Данные процессы обусловлены водной и ветровой эрозией почв, нарушением земель при разработке месторождений полезных ископаемых, минерализацией осушенных земель, изменением структуры и свойств почв при строительстве дорог и зданий, промышленным загрязнением почв химическими веществами и т.п. Площадь нарушенных, неиспользуемых и иных земель в Республике Беларусь по состоянию на 2022 год составила 486,3 тыс. га [1].

Для улучшения экологического состояния и эффективного использования земельных ресурсов в настоящее время реализуется комплекс мероприятий: деятельность по благоустройству территорий; создание лесозащитных насаждений; рациональное и научно-обоснованное внесение удобрений, химических средств защиты, регуляторов роста растений и иных средств химизации в почвы; переоборудование машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий для снижения давления на почву в процессе их эксплуатации и др. Таким образом, рациональное внесение удобрений на сельскохозяйственные угодья является одним из мероприятий, позволяющих улучшить качество земель.

Компост – это удобрение, получаемое в результате разложения органических материалов под влиянием деятельности различных организмов (бактерий, насекомых, червей и т.д.). При получении компостов в качестве одного из компонентов используют отходы сельского хозяйства (отходы животноводства, растительные остатки и др.) и различных отраслей промышленности (отходы деревообработки, производства пищевых продуктов и др.) [2]. Это позволяет вовлекать отходы во вторичное использование и снижать негативное воздействие на компоненты окружающей среды при размещении их на объектах хранения и захоронения. С другой стороны, использование отходов в качестве вторичных матери-

альных ресурсов способствует ресурсосбережению ценных материалов, применяемых для производства органических удобрений.

К числу крупнотоннажных отходов, которые могут использоваться для получения компостов, относятся такие отходы производства сахара, как транспортно-моечный осадок и свекловичный жом. В соответствии с классификатором отходов (ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» [3]) отход «жом свекловичный, хвосты свекловичного корня» имеет код 1141201 и относится к категории неопасных отходов. Транспортно-моечный осадок относится к отходу, имеющему наименование «прочие отходы производства сахара» – код 1141209. Степень опасности данного отхода в классификаторе [3] не указана, следовательно, собственники отходов обязаны установить степень их токсичности самостоятельно.

В Республике Беларусь функционирует четыре предприятия по производству сахара, для которых переработка указанных отходов является актуальной задачей.

Цель работы заключалась в получении компоста из отходов производства сахара (транспортно-моечного осадка и свекловичного жома) и оценка его товарных характеристик.

Объектом исследования в работе выступали отходы, образующиеся на одном из предприятий по производству сахара из свеклы. Указанные отходы подвергали компостированию. Сырьевую смесь для получения компоста готовили при различном массовом соотношении транспортно-моечного осадка к свекловичному жому (выступающим в роли наполнителя и источника веществ, необходимых для протекания эффективного процесса компостирования): от одной массовой части транспортно-моечного осадка к одной, двум, трем, четырем или пяти массовым частям наполнителя. Продолжительность процесса компостирования составляла 60 суток. В течение всего процесса компостирования проводили периодическое увлажнение и перемешивание компостируемой массы. По истечении указанного времени в водной вытяжке из компоста определяли содержание основных питательных элементов – азота, калия и фосфора.

Результаты исследования содержания питательных элементов в водной вытяжке из компоста, полученного из транспортно-моечного осадка и свекловичного жома, представлены в таблице.

Установлено, что компост, полученный при соотношении осадка и наполнителя, равном 1:1, характеризуется максимальным содержанием азота (1,29 мг/кг) и калия (в пересчете на K_2O количество составляет

1,96 мг/кг), а при массовых соотношениях отходов 1:3, 1:4, 1:5 – наибольшим содержанием фосфора (в пересчете на P_2O_5 количество составляет 0,02 мг/кг).

Таблица – Характеристика компостов, полученных из отходов производства сахара

Массовое соотношение отходов в сырьевой смеси (транспортно-моечный осадок:свекловичный жом)	Содержание питательных элементов в вытяжке из компоста, мг/кг			
	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	суммарное содержание
1:1	1,29	1,96	0,01	3,26
1:2	1,20	1,91	0,01	3,24
1:3	1,13	1,84	0,02	2,99
1:4	1,27	1,84	0,02	3,13
1:5	1,15	1,91	0,02	2,36

Высоким суммарным содержанием определяемых питательных элементов (азота, фосфора и калия) характеризуются компосты, полученные при массовых соотношениях транспортно-моечного осадка и свекловичного жома – 1:1 и 1:2.

Установлено, что в процессе компостирования снижается величина зольности отходов, о чем свидетельствует анализ значений зольности исходной сырьевой смеси и полученного компоста. Это свидетельствует о разложении органической части отходов.

Показано, что наибольшим значением зольности (43,6%) характеризуется компост, полученный на основе транспортно-моечного осадка и свекловичного жома с периодом компостирования 60 суток при массовом соотношении компонентов 1:1.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что полученные компосты по содержанию органических веществ соответствуют требованиям, предъявляемым к компостам, полученным на основе растительных отходов [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь за 2019–2022 годы: Нац. доклад / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Институт природопользования НАН Беларуси, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». – Минск, 2023. – 172 с.

2. Антоненко, Д. А. Особенности использования растительных

остатков для получения компостов // Научный журнал КубГАУ. 2017. №134. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ispolzovaniya-rastitelnyh-ostatkov-dlya-polucheniya-kompostov> – Дата доступа: 14.01.2025.

3. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p&p1=1>. – Дата доступа: 14.01.2025.

4. ГОСТ 34102-2017. Удобрения органические на основе органических отходов растениеводства и предприятий, перерабатывающих растениеводческую продукцию – Москва: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

УДК 504.4.062.2:666.3

О.С. Залыгина, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);

К.В. Завадский; М.А. Филиппук, учаш.

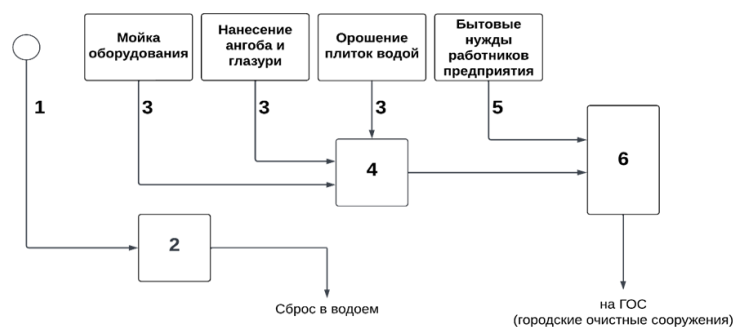
(УО «Национальный детский технопарк», г. Минск)

РЕЦИКЛИНГ СТОЧНЫХ ВОД КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Современные технологии требуют поиска экологически устойчивых решений в управлении водными ресурсами, особенно в производственных отраслях, где объёмы воды, используемой в технологических процессах, значительны. Одной из таких отраслей является керамическая промышленность. Рециклинг воды на предприятии способствует снижению затрат и минимизирует воздействие на окружающую среду.

Наибольшее количество воды в керамической промышленности используется для приготовления шликера. Поэтому целью данной работы является разработка эффективной системы очистки сточных вод предприятий керамической промышленности для организации их рециклинга с использованием в технологическом процессе для приготовления шликера без ухудшения качества конечной продукции.

Существует три вида сточных вод, образующихся на любых предприятиях: производственные, хозяйственно-бытовые и поверхностные. На рис. 1 представлена схема водоотведения на предприятиях керамической промышленности.



1 – поверхностные сточные воды; 2 – сооружения для очистки поверхностных сточных вод; 3 – производственные сточные воды; 4 – сооружения для очистки производственных сточных вод; 5 – хозяйственно-бытовые сточные воды; 6 – городские канализационные сети (ГКС).

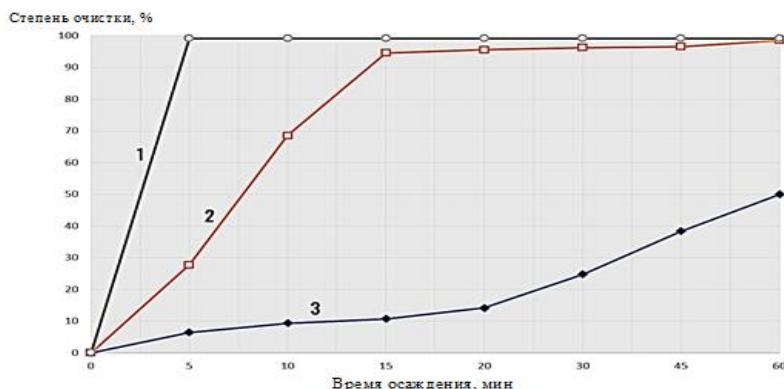
Рисунок 1 – Водоотведение на предприятиях керамической промышленности

Производственные сточные воды керамической промышленности загрязнены взвешенными веществами, а также соединениями железа, кальция, магния, которые обуславливают жёсткость воды.

Для исследований были отобраны пробы сточной воды одного из белорусских предприятий керамической промышленности. Определение содержания взвешенных веществ проводилось гравиметрическим методом, концентрации ионов Fe (II, III) – фотоколориметрическим методом с сульфосалициловой кислотой, определение жесткости – комплексонометрическим методом. Среднее содержание взвешенных веществ в пробах составило 11,74 г/дм³, жесткость – 5,36 ммоль/дм³, ионы железа обнаружены не были. Значения рН всех образцов находятся в пределах 6-8. В настоящее время на керамических предприятиях осуществляется очистка от взвешенных веществ, однако остаточное их содержание составляет около 40 мг/дм³, очистка от ионов жёсткости не производится вовсе. Для возврата воды в техпроцесс для приготовления шликера необходимо обеспечить более глубокую очистку сточных вод от взвешенных веществ, а также от ионов щелочноземельных металлов, введение которых в шликер уменьшает стабильность системы и может вызвать слипание глинистых частиц, их коагуляцию [1].

Для очистки сточных вод от взвешенных веществ наиболее простым и в то же время эффективным способом является коагуляция и флокуляция. В работе использовались наиболее распространенные коагулянты – хлорид железа FeCl₃, сульфат алюминия Al₂(SO₄)₃ и оксихлорид алюминия Al₂(OH)₅Cl, а также различные флокулянты – катионоактивный флокулянт (Zetag 8125), анионоактивный (Magnofloc 3230) и не-

ионогенный (Magnofloc LT20). Доза коагулянта варьировалась от 50 до 900, а флокулянта – от 1,5 до 20 мг на 1 дм³ сточной воды. В результате экспериментальных исследований было установлено, что наиболее эффективным коагулянтом является оксихлорид алюминия $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, а флокулянтом Zetag 8125 (рис. 2).



1 – флокулянт Zetag 8125, 9 мг на 1 дм³ сточной воды; 2 – оксихлорид алюминия $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, 600 мг на 1 дм³ сточной воды; 3 – без реагентов

Рисунок 2 – Кривые кинетики осаждения

Как видно из рис. 2, при применении оксихлорида алюминия в количестве 600 мг на 1 дм³ сточной воды достигается эффективность очистки около 98%, а при применении флокулянта Zetag 8125 в количестве 9 мг на 1 дм³ сточной воды – более 99%. Эффективность очистки в обоих случаях различается незначительно, однако при использовании флокулянта Zetag 8125 требуется значительно меньшее его количество, а очистка протекает гораздо быстрее – максимальная эффективность очистки достигается уже через 5 минут после добавления флокулянта.

Для очистки воды от ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , обуславливающих её жесткость, существуют термический, реагентный, сорбционный и ионообменный методы. При использовании реагентного метода в воду могут вноситься известь, кальцинированная сода, щелочь, фосфаты, оксалаты, ионы бария и т. д. Необходимую степень очистки для использования очищенной воды при приготовлении шликера обеспечивают ионообменный и фосфатный методы [2]. Однако, недостатком фосфатного метода является высокая стоимость реагента.

Для очистки ионообменным способом лучше использовать На-ионный катионит, так как это позволяет не затрачивать реагенты на нейтрализацию воды после очистки. Кроме того, ионы Na^+ и K^+ способствуют стабилизации шликера [1].

Чтобы определить необходимое соотношение ионита КУ-2-8 и

сточной воды, были проведены опыты с различным их соотношением и временем отстаивания. По результатам исследования лучшим соотношением является 40 г ионита на 100 мл сточной воды при отстаивании 60 минут (эффективность очистки составляет 90%). При этом жёсткость воды снижается до 0,5 ммоль/дм³, что свидетельствует о возможности её использования для приготовления шликера.

На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа литературы для очистки сточных вод предлагается схема, представленная на рис. 3.

Обезвоженный осадок в основном состоит из глины, поэтому предлагается его повторное использование в производстве керамического кирпича. Регенерацию катионита КУ-2-8 (Na⁺) предлагается проводить раствором поваренной соли. В ходе регенерации образуется элюат, содержащий хлориды кальция и магния. Эту смесь можно добавлять в бетон, что приведёт к сокращению времени схватывания бетона, повышению его стойкости к замораживанию и оттаиванию, повышению прочности на сжатие и на изгиб.

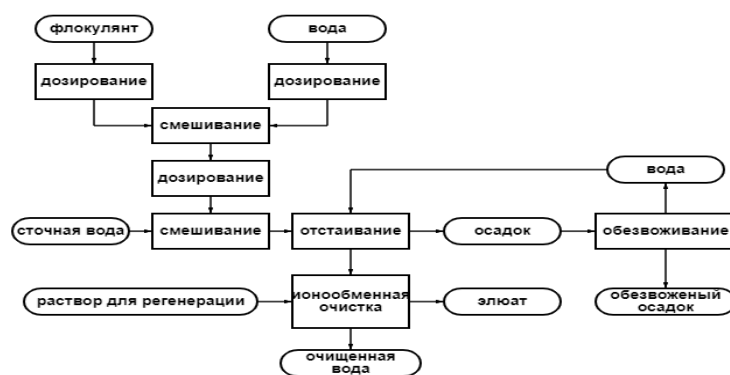


Рисунок 3 – Схема очистки сточных вод

Предложенная система очистки позволит вернуть очищенную воду в технологический процесс для приготовления шликера, что обеспечит уменьшение потребления такого ценного ресурса как вода и снизит воздействие предприятий керамической промышленности на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толкачева, А.С. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учеб. пособие / А.С. Толкачева, И.А. Павлова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 184 с.
2. Савенкова, И. В. Жесткость воды и методы ее умягчения / И.В. Савенкова, Ф.Ф. Ниязи. – Курск: Курский государственный технический университет, 2013. – 18 с.

А.К. Клинцева, студ. (ФГБОУ ВО «КПФУ» г. Казань, Россия);
Т.Ю. Гумеров, проф. (ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия)

ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Загрязнение воды, изменение климата, эрозия почвы, опасные отходы, истощение ресурсов и утрата биоразнообразия – глобальные проблемы экологии на протяжении многих лет. Эти экологические проблемы представляют серьезную угрозу для качества жизни человека и устойчивости экосистем, и поэтому защита природной среды стала важной задачей для отдельных лиц и организаций. Экологи добились больших успехов в развитии науки, теорий и методов восстановления окружающей среды. Будучи вовлеченной междисциплинарной областью, инженерия окружающей среды охватывает широкие научные дисциплины, такие как химия, биология, физика, математика и экономика для разработки практических решений по обработке и контролю природных и антропогенных загрязнителей во всех матрицах окружающей среды, тем самым поддерживая здоровье всех живых существ и улучшая качество окружающей среды.

Прорывы в управлении сточными водами, контроле загрязнения воздуха, восстановлении почв и утилизации отходов ознаменовали собой повышение уровня жизни человечества. Например, технология анаэробного окисления аммония вводит инновации в прямое окисление аммиака до газообразного азота (N_2) без образования токсичной закиси азота (N_2O , своего рода парникового газа), который в значительной степени регулирует азотный круговорот в процессе очистки сточных вод.

Углекислый газ (CO_2), составляющий основную часть парниковых газов, был признан основной причиной изменения климата. Для управления высокими выбросами углерода в атмосферу важную роль в достижении цели углеродной нейтральности играет технология улавливания, утилизации и хранения углерода, которая включает в себя улавливание CO_2 из антропогенных источников и распределение его по различным процессам утилизации или хранения. Почвы, загрязненные тяжелыми металлами, привлекают внимание мировой общественности из-за растущей обеспокоенности по поводу безопасности подземных вод и сельскохозяйственной продукции. Фиторемедиация привлекает все большее внимание благодаря своей экономичности, экологичности и хорошей эффективности. В настоящее время около 500 видов растений иденти-

фицированы как гипераккумуляторы металлов и используются для восстановления почв. Кроме того, контролируемый пиролиз пластиковых отходов с образованием функциональных материалов на основе углерода с добавленной стоимостью может не только помочь в управлении опасными твердыми отходами, но и снизить затраты на производство новых материалов. Замкнутый цикл повторного использования твердых отходов ускоряет циркуляцию веществ и одновременно ограничивает негативное воздействие твердых отходов на окружающую среду.

Достижения, основанные на различных практических методах борьбы с загрязнением, помогают смягчить насущные экологические проблемы, но нынешнее состояние все еще далеко от удовлетворительного.

Экологическая инженерия представляет собой одну из наиболее важных областей для устойчивого человеческого общества. Успех в области экологической инженерии требует совместных усилий в области методологии снижения загрязнения, нанотехнологий, инженерного проектирования и т.д.

Точная идентификация загрязняющих веществ в окружающей среде является необходимым условием для определения уровня загрязнения и анализа эффективности и механизма процесса деградации. В настоящее время проблематично обнаружить новые загрязнители в различных экологических матрицах с широким диапазоном концентраций, особенно новые загрязнители (например, микро(нано)пластик, вирусы, фармацевтические препараты, бактерии, пестициды, наноматериалы, ПАВ, промышленные добавки, перфторированные соединения) и их производные. Загрязняющие вещества со схожими физико-химическими свойствами (например, плотностью, формой, химической структурой, молекулярной массой) обычно встречаются в окружающей среде, что затрудняет их идентификацию по отдельности. Поэтому разработка передовых аналитических методов и установок с высокой чувствительностью и селективностью для получения точной идентификации, подтверждения и количественной оценки различных известных и неизвестных загрязнителей является весьма востребованной.

Экономичные и безопасные функциональные материалы для борьбы с загрязнением. Для большинства процессов разложения загрязняющих веществ требуются функциональные материалы или химические вещества. Например, при очистке сточных вод абсорбенты обычно используются для извлечения органических и неорганических загрязните-

лей, катализаторы необходимы в фото-, электро- и термокатализе, процессах глубокого окисления и продвинутых восстановительных процессах, а флокулянты используются в процессе флокуляции. Применение этих функциональных материалов играет решающую роль в повышении эффективности очистки. Многие материалы изготавливаются с помощью сложных процессов и высоких затрат, что значительно ограничивает их широкомасштабное применение. С этой целью разработка экономически эффективных функциональных материалов из распространенных на земле отходов с использованием простых методов является неотложной для устойчивого контроля загрязнения.

Глубокое понимание механизмов деградации загрязнителей остается большой проблемой, особенно в сложных экологических системах. Для процессов восстановления рекомендуется раскрыть механизм деградации на атомном и молекулярном уровнях с использованием современных экспериментальных и вычислительных инструментов. Методы *in situ* (для создания соединений непосредственно в реакционной среде без выделения промежуточных соединений) жизненно важны для изучения чувствительных к окружающей среде процессов, таких как термокатализ и электрокатализ, которые могут предоставить значимую информацию о промежуточных продуктах реакции и, таким образом, улучшить понимание путей реакции

Интегрированные технологии. Как правило, трудно обрабатывать несколько загрязнителей с помощью одного метода из-за различий в свойствах загрязнителей, таких как вид, плотность, концентрация, токсичность и химическая стойкость. Соответственно, решение большинства реальных экологических проблем обуславливает необходимость разработки комплексных технологий. Используя преимущества различных методов, интегрированные стратегии можно повысить эффективность восстановления. На сегодняшний день для восстановления окружающей среды успешно реализовано сопряжение электрохимических, физических, биологических и других процессов. Будущая оптимизация интегрированных технологий должна учитывать эффективность и стоимость, а также воздействие на окружающую среду.

С быстрым развитием вычислительных технологий методы искусственного интеллекта, такие как искусственные нейронные сети, адаптивные нейронечеткие системы и нечеткая логика, становятся мощными инструментами в управлении сложными системами окружающей среды. Прогностические модели на основе искусственного интеллекта успешно

используются для восстановления сточных вод, загрязнения воздуха, защиты почв и управления твердыми отходами

Область инженерии окружающей среды играет важную роль в поддержании развития природной экосистемы. Существует растущий спрос на прогресс в передовых теориях, методах, материалах, технике и средствах для решения современных экологических проблем. Такое направление исследований положительно стимулирует развитие экологической инженерии для здорового и устойчивого общества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bing-Jie Ni. Grand challenges in environmental engineering // Frontiers in Environmental Engineering. 2022. URL: <http://www.frontiersin.org/journals/environmental-engineering/articles/10.3389/fenv.2022.1052154/full> (дата обращения: 19.01.2025).

2. Овезмырадова Г., Ахмедова Г., Маммедова Ш., Аннаева Г. Современные методы биотехнологии // Академическая публицистика. 2024. № 10-1. С. 20-24.

3. Заславский М. М. Разработка системы экологического мониторинга на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 56-69.

УДК 628.316.12

А. Ю. Курбатов, доц., канд. техн. наук;

П. Ю. Перевощикова, студ.

(РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Россия)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСТРУКЦИИ ДВУХАТОМНОГО ФЕНОЛА

В последнее десятилетие природоохранные мероприятия носят всё более масштабный характер. Окружающая среда, в частности, водные объекты, расположенные вблизи крупных промышленных зон, сегодня находятся под постоянным и тщательным контролем специалистов. Несмотря на предпринимаемые меры, поверхностные и подземные воды продолжают загрязняться ввиду активной хозяйственной деятельности человека [1].

Одним из наиболее опасных стоков являются фенолсодержащие. Фенолами загрязнены сточные воды таких отраслей как металлургическая, нефтехимическая, фармацевтическая, строительная и даже производство минеральных удобрений. Предельно допустимая концентрация фенола в водах составляет $0,001 \text{ мг/дм}^3$ [2], в свою очередь сточные воды предприятий могут содержать в себе до 30 г/дм^3 фенолов [3]. Неконтролируемый сброс или сброс недостаточно очищенных сточных вод приводит к локальной катастрофе, вследствие которой будет затронута вся флора и фауна водного объекта. Одним из опаснейших свойств фенола является то, что он способен вступать в реакцию с получением более токсичных соединений, таких как хлорфенолы.

Традиционными методами обработки считаются озонирование, биологическая очистка или обратный осмос. Все перечисленные методы имеют и ряд недостатков, в связи с чем поиск наиболее эффективного метода и энерго- ресурсосберегающей технологии не останавливается. Одним из таких методов является высокоинтенсивные окислительные процессы (AOPs – Advanced Oxidation Process) [4].

В качестве объекта исследования был выбран водный модельный раствор двухатомного фенола – резорцина концентрацией 10 мг/дм^3 . Исследования по фотодеструкции растворов проводили на установке, описанной в работе [5]. В качестве УФ- излучения применялась лампа ДРБ-8. Мощность излучения составила $1,74 \text{ Вт}$. Эффективность деструкции резорцина оценивали спектрофотометрически [6]. Методика исследования деструкции заключалась в следующем: в кварцевые пробирки заливались 50 мл исходного раствора резорцина, которые помещались в реактор от 15 до 90 минут. После обработки аликвота подвергалась центрифугированию на 10 минут 300 обр./мин .

В качестве интенсификаторов деструкции были выбраны: тиосульфат титана раствор (используемая концентрация 1 мл/дм^3 модельного раствора), пероксид водорода (3% раствор, используемая концентрация 1 мл/дм^3), коммерческий катализатор Digussa P25 (представляющий собой наночастицы диоксида титана, концентрация 20 мг/л).

Изначально была определена эффективность окисления резорцина без интенсификаторов деструкции, исключительно под воздействием УФ-излучения, а также определен окислительно-восстановительный потенциал системы (рис. 1).

Несмотря на возрастающий окислительно-восстановительный потенциал (рис. 2) достичь эффективности деструкции выше 35% (рис. 1 б)

не удалось. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что с помощью только ультрафиолетового излучения окислить двухатомный фенол за 90 минут не представляется возможным и требуется дополнительное введение интенсификаторов процесса.

Следующей стадией работы было определение влияния добавок интенсификаторов окисления в систему.

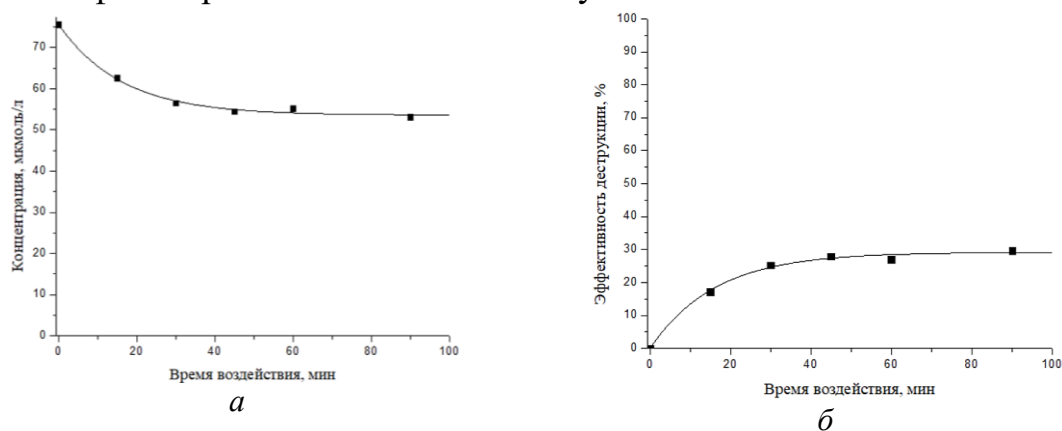


Рисунок 1 – Кинетика (а) и эффективность (б) деструкции модельного раствора резорцина в отсутствии интенсификаторов окисления

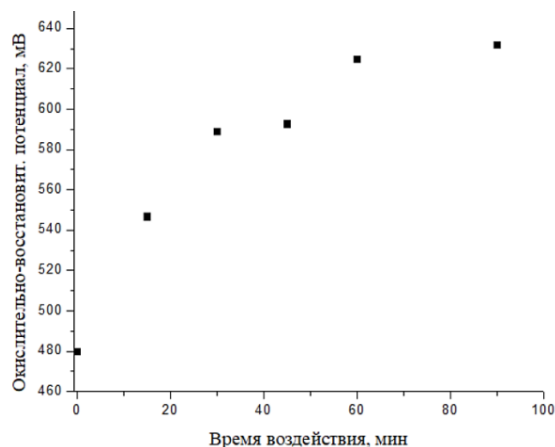


Рисунок 2 – Окислительно-восстановительный потенциал модельного раствора резорцина при УФ-обработке

Установлено (рис. 3), что все катализаторы процесса увеличивают эффективность деструкции резорцина. Тиосульфат титана позволяет достичь 80% окисления за 90 минут, коммерческий катализатор P25 – 95%, пероксид водорода показал наиболее эффективные результаты из сравниваемых интенсификаторов, удалось добиться окисления свыше 99,9% резорцина через 60 минут.

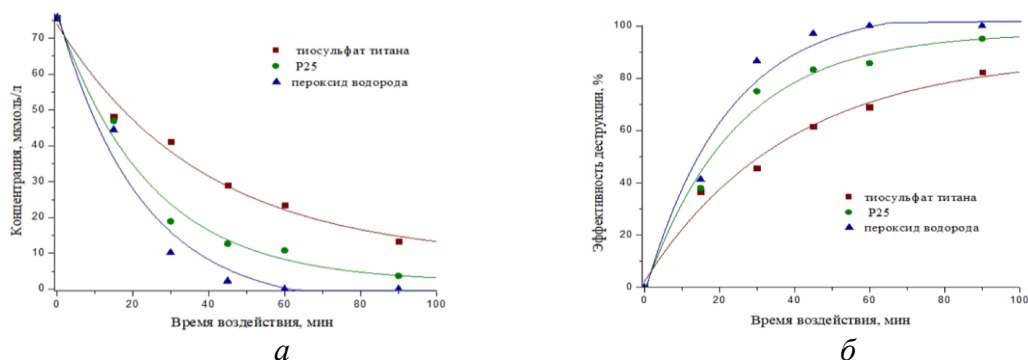


Рисунок 3 – Кинетика (а) и эффективность (б) деструкции модельного раствора резорцина в присутствии интенсификаторов окисления

В ходе исследования деструкции двухатомного фенола – резорцина под воздействием УФ-света было установлено, что целесообразно применение интенсификаторов. Комбинация окислительных методов обеспечивает более эффективное решение при очистке модельной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобкова Е. С. и др. Сравнительное исследование кинетики разложения фенола и некоторых СПАВ в водных растворах в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления в кислороде // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. №. 4. С. 110-114.
2. Онищенко Г. Г. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования // Дополнения и изменения к ГН. – 2008. – Т. 2. – №. 5. – С. 1315-03.
3. Смирнова В. С., Худорожкова С. А., Ручкинова О. И. Очистка высококонцентрированных сточных вод промышленных предприятий от фенолов // Construction and Geotechnics. 2017. Т. 8. №. 2. С. 52-63.
4. Chuang Y. H. et al. Comparing the UV/monochloramine and UV/free chlorine advanced oxidation processes (AOPs) to the UV/hydrogen peroxide AOP under scenarios relevant to potable reuse // Environmental science & technology. 2017. Т. 51. №. 23. С. 13859-13868.
5. Иванцова Н. А. и др. Фотоокислительная деструкция нитрофурала в присутствии графитового нитрида углерода // Химическая промышленность сегодня. 2022. №. 1. С. 6-13.
6. ПНД Ф. 14.1:2.105-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации летучих фенолов в природных и очищенных сточных водах фотометрическим методом после отгонки с водяным паром.

Р.Д. Сайфутдинова, ассист.;
С.В. Степанова, проф., д-р техн. наук
(ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия)

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В условиях современного индустриального общества экологические проблемы приобретают все более острый характер, затрагивая различные аспекты окружающей среды и человеческой деятельности.

Республика Татарстан относится к регионам, в которых развиты нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая, химическая, нефтехимическая и другие отрасли промышленности, а также сельское хозяйство. Поэтому сама идея вторичного применения сельхозотходов (СО) для производства более дешевого сорбционного материала (СМ), из-за снижения затрат на логистику, транспортные расходы, не уступающего по адсорбционной емкости традиционным сорбентам, является актуальной, позволяющей решить ряд экологических проблем. Целлюлоза и лигнин, которые являются частью клеточных стенок растений, формируют основу структуры СО. Благодаря этому в ней образуются микро- и макропоры, что позволяет использовать СО в качестве сорбентов для сбора нефти с поверхности воды.

Целью исследования является выявление токсического воздействия вод, очищенных от нефти различными отходами сельского хозяйства (шелухи пшеницы - ШП), на всхожесть и рост растений.

Применение СО в нативном виде при удалении пленок нефти с поверхности воды способствует вторичному загрязнению очищенных вод (возрастает цветность, мутность и значение ХПК), что обусловлено присутствием механических и физических примесей. Поэтому для предотвращения данного недостатка, а также увеличения срока эксплуатации полученных СМ, их биостойкости, проводилась обработка исходных образцов различными методами: химическим – 1 % раствором H_2SO_4 (КШП) и 1 % раствором $NaOH$ (ЩШП) (при времени выдержки 60 минут, температуре 20 °С, соотношении модификатор к СО 20:1); физическим – термическое воздействие (150 ± 10 °С 30 минут в присутствии кислорода воздуха) (ТШП).

Известно, что в результате химической обработки растительных отходов увеличивается реакционная доступность целлюлозы, но при

этом происходит снижение массы растительного сырья на 15-20 % за счет растворения гемицеллюлоз, водорастворимого лигнина и экстрактивных веществ, при этом возрастает количество α -целлюлозы. Кроме того, разрыхляется структура целлюлозного волокна, увеличивается его внутренняя поверхность, что способствует проникновению растворителей и реагентов [4].

Известно, что во время термической модификации структура материала изменяется на молекулярном уровне – образуется углерод. Волокна и связи расщепляются под воздействием температуры и давления. При 100-170 °С происходит удаление свободной и связанной влаги, а также других летучих составляющих, в итоге поверхность становится влагоустойчивой, стойкой к деформациям, гниению, заражению паразитами и менее пористой, однако масса продукта уменьшается примерно на 50 % [5].

В результате проведенных исследований определено максимальное значение сорбционной емкости СО по отношению к нефти: ШП – 9 г/г, КШП – 16 г/г, ЩШП – 14 г/г, ТШП – 23 г/г. При этом максимальная эффективность удаления пленки нефти с поверхности воды для образца ШП – 95,29 %, КШП – 97,65 %, ЩШП – 96,47 %, ТШП – 97,65 %. Так как значение ПДК нефти в воде не было достигнуто при применении СМ на основе СО, то авторами предложено биотестирование для оценки состояния водных объектов [2]. Важность данного метода заключается в его способности выявлять даже низкие концентрации загрязняющих веществ, оказывающих долгосрочное влияние на экосистемы и здоровье человека. В качестве тест-объектов исследованы семена высших растений редиса и кресс-салата [1, 3].

Первоначально оценивалось влияние на рост и развитие тест – объектов, исследуемой пробы модельной воды (МВ), загрязнённой нефтью концентрацией 17 г/дм³ (таблица 1). Контрольные показатели всхожести были получены при проращивании семян в дистиллированной воде. Проведённые эксперименты показали значительное снижение энергии прорастания и всхожести семян редиса (в 5 раз) и кресс-салата (в 1,75 раз), что указывает на сильное влияние нефти на всхожесть, длину побега (на 66,46 % для семян редиса и на 40,41 % для семян кресс-салата) и биомассу тест-объектов (на 73,81 % и 40,98 %, соответственно). Индекс фитотоксичности исследуемой пробы составил 0,6 для семян редиса и 0,2 для семян кресс-салата указывает на средний и слабый уровень загрязнения для исследованных проб.

Таблица 1 – Характеристика тест – культур

Предмет исследования	Семена редиса		Семена кресс – салата	
	Контроль	МВ	Контроль	МВ
Энергия прорастания	10	2±0,96	10	5,75±1,125
Всхожесть	10	4±0,96	10	8±1,662
Длина побега, мм	23,925±4,42	8,025±1,84	19,43±0,632	11,58±1,01
Биомасса, г	0,105±0,02	0,028±0,011	0,014±0,001	0,009±0,002

Далее проводились исследования об определении токсичности очищенных нефтезагрязненных модельных вод (исходная концентрация нефти в воде – 17 г/дм³) сорбентами на основе СО (массой 1 г). Проращивались семена редиса и кресс – салата в пробах воды, полученных при ликвидации разлива нефти различными растительными сорбентами. Фиксировались значения энергии прорастания, всхожести, длины побега, биомассы тест – объектов. Результаты представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Характеристика пророщенных семян редиса (*Raphanus sativus* L) с использованием МВ, очищенной от нефти СМ

Предмет исследования	ШП	ТШП	КШП	ЩШП
Энергия прорастания	6,25 ± 1,13	9 ± 0,96	5,75 ± 1,48	4 ± 0,96
Всхожесть	9,25 ± 1,13	10	7,75 ± 1,48	8,75 ± 1,13
Длина побега, мм	14,18 ± 4,48	23,15 ± 3,02	12,1 ± 1,21	15,413 ± 5,34
Биомасса, г	0,06 ± 0,025	0,08 ± 0,017	0,058 ± 0,02	0,055 ± 0,015

По полученным результатам произведена статистическая обработка полученных данных и произведено сравнение показателей с контрольным и исходным. Обнаружено, что применение КШП в качестве СМ эффективно удаляет нефтяное загрязнение до 97,65 %, но его применение негативно сказывается на всхожести и длину побега семян редиса. Рекомендовано применять ТШП, так как фитотоксичность вод снижается на 100 % при таком же значении эффективности использования в качестве СМ.

Таблица 3 – Характеристика пророщенных семян кресс-салата (*Lipidium sativum* L) с использованием МВ, очищенной от нефти СМ

Предмет исследования	ШП	ТШП	КШП	ЩШП
Энергия прорастания	9,25 ± 1,125	8,25 ± 1,763	7,75 ± 1,125	7 ± 0,959
Всхожесть	9,25 ± 1,125	9,75 ± 0,588	9,5 ± 0,678	9,75 ± 0,588
Длина побега, мм	19,62 ± 2,032	16,625 ± 0,562	18,075 ± 0,714	19,85 ± 1,062
Биомасса, г	0,011 ± 0,003	0,012 ± 0,001	0,013 ± 0,002	0,013 ± 0,003

Таким образом, применение СМ на основе СО для очистки воды от нефти значительно снижает её фитотоксичность. Очищенная вода улучшает условия для прорастания и роста растений, что подтверждается увеличением энергии прорастания, всхожести, длины побега и биомассы семян редиса и кресс-салата. Индекс фитотоксичности очищенной воды указывает на отсутствие значительного загрязнения, что свидетельствует о высокой эффективности применения растительных отходов в процессе очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова, В. В. Биотестирование как современный метод оценки токсичности природных и сточных вод / В. В. Александрова. – Нижневартовск: НВГУ, 2013. – 119 с. – Текст: непосредственный.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации(ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно – питьевого и культурно – бытового водопользования». – Текст: электронный // Гарант.Ру: [сайт]. – URL: https://base.garant.ru/12130908/#block_1000 (дата обращения: 20.01.2025).
3. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – Текст: электронный // электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023365> (дата обращения: 20.01.2025).
4. Модификация структуры и свойств целлюлозы: монография / В.А. Петров [и др.] – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 172 с.
5. Секушин Н.А., Кочетова Л.С., Демин В.А. Количественный рентгеноструктурный анализ // Химия растительного сырья. – 1999. – №1. – С. 59–64.

УДК 631.3

У.К. Кенджаев, ассист.
(Горно-металлургический институт Таджикистана, г. Бустон)

ИЗУЧЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ТАДЖИКИСТАНЕ

Таджикистан – страна, обладающая уникальными водными ресурсами, которые являются жизненно важными как для экосистемы, так и для экономики данного региона. Согласно данным Всемирного банка, более 90% территории страны занимает горный ландшафт, и именно в горах концентрируется около 60% всех водных ресурсов Таджикистана. Однако, несмотря на такое богатство, управление водными ресурсами

остается одной из самых сложных задач в стране. В данной работе рассмотрены ключевые аспекты исследования водных ресурсов в Таджикистане, их значение для страны, а также проблемы, с которыми сталкивается эта область.

Первым важным моментом следует отметить, что основными водными ресурсами Таджикистана являются реки, находящиеся в горных регионах. Река Вахш, одна из крупнейших рек страны, играет решающую роль в орошении сельскохозяйственных угодий и функциональности гидроэлектростанций. Гидроэнергетика является одной из важнейших отраслей экономики Таджикистана. По состоянию на 2022 год, гидроэлектростанции обеспечивают около 95% всей электроэнергии, производимой в стране. Это подчеркивает необходимость бережного обращения с водными ресурсами, их правильного использования и систематического мониторинга.

Проблемы, связанные с водными ресурсами в Таджикистане, многоаспектны. Одна из самых серьезных – это изменение климата. Последствия глобального потепления уже начинают оказывать значительное влияние на уровень водных ресурсов, в частности на снежные покровы и ледники. По данным научных исследований, ледники Таджикистана за последние три десятилетия сокращаются на 30%. Это вызывает опасения о потенциальной нехватке воды в будущем, что может негативно сказаться на сельском хозяйстве, которое является основным источником дохода для большинства населения.

Кроме того, проблемы, связанные с управлением водными ресурсами, также затрагивают трансграничные водные потоки. Таджикистан делит свои водные ресурсы с соседними странами, такими как Узбекистан и Кыргызстан. Конфликты по поводу распределения воды часто приводят к напряженности между государствами. Важно найти механизмы для справедливого разделения ресурсов, чтобы каждый регион мог эффективно использовать воду, не нанося ущерба соседям. Местные жители регионов стремятся находить устойчивые решения, налаживая диалог и соглашения на основе взаимных интересов.

С точки зрения научных исследований, начинаются важные программы, нацеленные на улучшение мониторинга и управления водными ресурсами. Например, одним из ключевых проектов стало создание единой информационной базы данных, в которой будут собираться данные о состоянии водоемов и уровне их загрязнения. Это поможет не только в оценке текущего состояния водных ресурсов, но и в разработке страте-

гий для их эффективного использования.

Также стоит обратить внимание на роль образования и повышения осведомленности о важности сохранения водных ресурсов. Участие в учебных семинарах и конференциях по водным ресурсам открывает глаза на различные аспекты этой проблемы. Молодежные движения в Таджикистане активно участвуют в охране окружающей среды, а также в вопросах рационального водопользования.

Изучение и управление водными ресурсами в Таджикистане – это многогранная задача, требующая комплексного подхода. Вода не только поддерживает жизнь в стране, но и является основой экономики. Решение связанных с ней проблем требует сотрудничества на внутреннем и международном уровнях, а также активного вовлечения местных сообществ. Эффективное управление водными ресурсами сегодня является важным шагом к устойчивому будущему Таджикистана, что в свою очередь потребует от нас небезразличия, научной активности и готовности к диалогу.

Таджикистан обладает огромным потенциалом в области водных ресурсов, являясь одним из лидеров по запасам пресной воды в Центральной Азии. Главными источниками воды в стране служат ледники, реки и озера, наиболее значимые из которых – река Вахш, Пяндж и Сырдарья. Однако использование водных ресурсов сопровождается рядом вызовов: ускоренное таяние ледников из-за изменения климата, нерациональное использование воды в сельском хозяйстве, проблемы с качеством питьевой воды в некоторых регионах и необходимость модернизации водохозяйственной инфраструктуры. Для устойчивого управления водными ресурсами в Таджикистане важно:

Для устойчивого управления водными ресурсами в Таджикистане важно:

1. Внедрение современных технологий ирригации и водоочистки.
2. Проведение научных исследований для оценки влияния климатических изменений на водный баланс страны.
3. Активное участие в региональном сотрудничестве для координации использования трансграничных вод.
4. Повышение осведомленности населения о необходимости бережного отношения к водным ресурсам.

Вода – стратегический ресурс, играющий ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности, энергетики и экологии. Устойчивое управление водными ресурсами является залогом развития страны

и стабильности региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водные ресурсы, инновация, ресурсо и энергосбережения // Материалы Международной научно-практической конференции. – Таджикистан: Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Таджикистана. Душанбе, 6-7 октября 2023 года. – 288 с.
2. Водная дипломатия Эмомали Рахмона: от первого шага до глобального партнерства. Документы, выступления и материалы. 1999–2024 годы / Сироджиддин Мухриддин. – Москва, Весь Мир, 2024. – 420 с.
3. Размолодин, П. В. Водные ресурсы Таджикской ССР, их рациональное использование и охрана : [Перевод] / П. В. Размолодин. – Душанбе : Ирфон, 1983. – 18 с.
4. Ориф А., Номвар К. Инициативы Таджикистана, связанные с водными вопросами и обеспечением целей устойчивого развития. – Душанбе: «Дониш», 2022. – 79 с.

УДК 504.06

В.В. Дворцевая, студ.; Л.Г. Левченко, ст. преп.
(ФГБОУ ВО «ДонНАСА», г. Макеевка, ДНР)

ПРИМЕНЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Основная проблема радиационной безопасности – оптимизация комплекса мероприятий, направленных на защиту населения и персонала. Недостаток этих мер угрожает здоровью, а их избыток приводит к неэффективному использованию ресурсов.

Вопросы радиационной безопасности исследовались многими отечественными и зарубежными учёными, включая Л. А. Ильину, А.В. Аксеева, Р. Кларка и других. Однако значительная часть текущих проблем связана с утратой данных о прошлой радиационно-опасной деятельности. Радиоэкологический мониторинг в Донецкой Народной Республике выявил нарушения радиационного контроля на предприятиях.

Целью работы является изучить инновационные подходы к снижению риска последствий техногенного радиационного облучения для здоровья человека, а также поддержание индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц на минимально возможном уровне.

Источники ионизирующего излучения делятся на природные и

техногенные. К природным относятся земная и космическая радиация, создающие фоновую дозу около 1,4 мЗв/год. Техногенные включают ядерные реакторы, медицинские аппараты, гамма-дефектоскопы и другие устройства. Техногенные источники делятся на радионуклидные (использующие радиоактивные изотопы) и физико-технические (например, рентгеновские трубки)[3]. Радионуклидные источники бывают открытые (ОРИ) и закрытые (ЗРИ). ОРИ могут загрязнять окружающую среду при использовании, а ЗРИ сконструированы так, чтобы исключить утечку радионуклидов. Примером ЗРИ служат устройства с двойной капсулой, использующие радионуклиды Cs-137 и Co-60 [4].

Радиоизотопные приборы (РИП) широко используются в угольной, металлургической и других отраслях промышленности. На предприятиях Донецкой Народной Республики такие приборы применяются для:

- контроля уровня материалов в бункерах;
- измерения зольности угля;
- автоматизации шахтных подъемов [5].

Примеры оборудования: измерители зольности (РКТП-6), уровнемеры (ГР-7С, ГР-6С), влагомеры (ВПН-03). Эти устройства повышают производительность и безопасность, минимизируют воздействие внешних факторов на измерения и обеспечивают значительный экономический эффект.

На металлургических предприятиях радиоизотопные приборы применяются для контроля уровня жидкого металла, пылеугольного топлива и влажности. Например, устройства с радионуклидом Co-60 используются в машинах непрерывного литья [6].

РИП представляют потенциальную опасность из-за ионизирующего излучения (гамма-, альфа-, бета-, нейтронное излучение) и возможного радиоактивного загрязнения. На многих предприятиях ДНР выявлены нарушения требований радиационной безопасности:

- отсутствие строгого контроля со стороны регулирующих органов;
- недостаточная осведомлённость персонала;
- отсутствие специализированных организаций для утилизации ИИИ [6].

СанПиН 2.6.1.1015-01 требует, чтобы устаревшие РИП демонтировались лицензированными организациями, однако на территории ДНР таких организаций нет.

Ослабление государственного надзора, недостаточная эффектив-

ность правовых и экономических механизмов предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций увеличивают риск катастроф техногенного характера во всех сферах радиационной деятельности. При этом недостаточно изучены вопросы безопасного обращения с радиоактивными отходами, медицинских последствий малых доз радиационного воздействия, радиационной безопасности населения территорий, загрязненных в результате аварий на радиационно опасных объектах. Сложность положения усугубляется тем, что часто невозможно получить достоверные данные о радиационной обстановке, особенно в закрытых организациях, использующих радиационно опасные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности [Электронный ресурс] : (ОСПОРБ-99/2010): постановление ГГСВ РФ от 26.04.2010 г. № 40. Доступ из справ.-правовой системы «Законы, кодексы и нормативно-правовые акты РФ».

2. Нормы радиационной безопасности «НРБ-99/2009». Санитарные правила и нормативы «СанПиН 2.6.1.2523-09» [Электронный ресурс] : постановление ГГСВ РФ от 07. 07.2010 г. № 47. Доступ из справ.-правовой системы «Законы, кодексы и нормативно-правовые акты РФ».

3. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности РФ на период до 2025 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс] : Указ Президента РФ от 13.10.2018 г. № 585. Доступ из справ.-правовой системы «Законы, кодексы и нормативно-правовые акты РФ».

4. Росстандарт: Временный порядок признания федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии организации пригодной эксплуатировать радиационные источники и осуществлять деятельность по обращению с радиоактивными веществами в отношении подведомственных организаций, а также в отношении организаций, осуществляющих (планирующих осуществлять) деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [Электронный ресурс] : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.06.2023 г. № 1173.]. Доступ из справ.-правовой системы «Законы, кодексы и нормативно-правовые акты РФ».

5. Афонин П. Н., Афонин Д. Н., Данько Д. Ю. [и др.]. Обеспечение радиационной безопасности при применении по целевому назначению и эксплуатации источников ионизирующих излучений (генерирующих) : учебное пособие. – Москва : Российская таможенная академия. [сайт].

[2016]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/69477.html> (дата обращения: 08.10.2024)

6. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации радиоизотопных приборов. Санитарные правила и нормативы «СанПиН 2.6.1.1015-01. 2.6.1» [Электронный ресурс] : постановление ГГСВ РФ от 01.02.2001 г. Доступ из справ.-правовой системы «Законы, кодексы и нормативно-правовые акты РФ».

УДК 628.349.087.3; 628.316.12

Н.А. Иванцова, доц., канд. хим. наук;
А.Ю. Шлыкова, студ. (РХТУ, г. Москва, Россия);
А.И. Заричный, руководитель функции Экология
(ООО «СИБУР», г. Москва, Россия)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СЕРНИСТО-ЩЕЛОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ОЗОНИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЯ

Очистка сточных вод является одной из главных задач современности. В сточных водах промышленных предприятий содержатся трудно-окисляемые органические соединения, которые способны к аккумуляции и токсическому воздействию на гидробионтов. Данные стоки представляют собой значительную опасность вследствие сложности их очистки [1].

Одним из примеров таких сточных вод являются сернисто-щелочные сточные воды, образующиеся на нефтехимических и нефтеперерабатывающих комплексах. Стоки образуются в результате очистки газов пиролиза от сероводорода и диоксида углерода в производстве низших олефинов, при щелочной обработке сжиженных газов, бензиновых и керосиновых фракций в процессе нефтепереработки из рефлюксных резервуаров. Образующиеся стоки представляют собой растворы смеси фенолов, углеводов, соединений серы в виде сульфатов, сульфитов, сульфидов и меркаптидов, а также в их составе имеются взвешенные вещества [2].

Далеко не на всех предприятиях организована очистка СЩС на собственных локальных очистных сооружениях, зачастую они в составе сточных вод предприятия транзитом направляются на городские очист-

ные сооружения, оказывая на них дополнительную нагрузку и снижая эффективность [3].

На сегодняшний день имеются способы очистки сернисто-щелочных сточных вод, но они не дают высокой эффективности [2], поэтому необходим поиск новых методов. В связи с этим всю большую популярность приобретают окислительные технологии (AOPs – Advanced Oxidation Processes) [4]. Они основаны на неселективном характере образования реакционноспособных молекул – радикалов, которые обладают высоким окислительным потенциалом. К таким процессам можно отнести озонирование и электрохимическое окисление.

Поэтому, целью данной работы была оценка возможности применения процессов озонирования и электроокисления для очистки сернисто-щелочных сточных вод (СЩС). Объектом исследования являлся реальный СЩС нефтегазохимического предприятия.

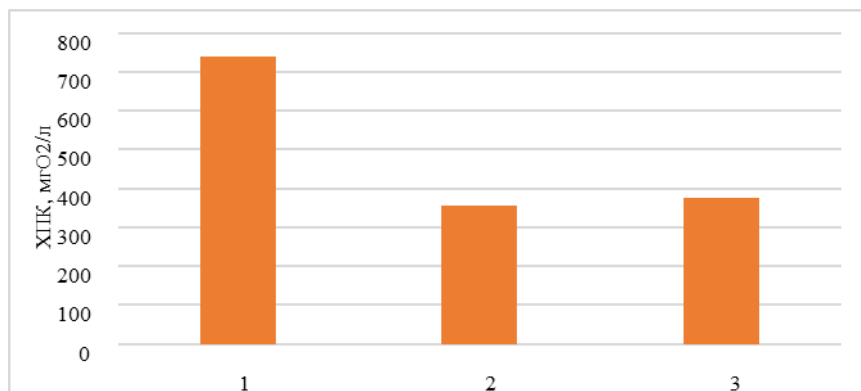
Одним из основных показателей загрязненности сточных вод можно назвать химическое потребление кислорода (ХПК). Поэтому на первом этапе исследования были определены входные параметры: водородный показатель (рН) и ХПК. Д

ля определения ХПК и проведения дальнейших экспериментов СЩС был предварительно разбавлен в 100 раз. Метод определения ХПК по ГОСТ 31859 подходит для всех типов вод (питьевых, природных, сточных) в диапазоне значений от 10 до 800 мгО₂/л, а также может использоваться для анализа проб с высокими значениями ХПК при условии разбавления, но не более, чем в 100 раз [5]. Полученные результаты исследований рН – 10; ХПК – 740 мгО₂/л.

На втором этапе исследования было произведено электрохимическое окисление разбавленной сточной воды. Электролиз проводился на электродах Ti/Pt; подробная схема установки представлена в работе [6]. Объем раствора – 150 мл, время обработки составило 30 минут, плотность тока – 1875 А/м². По результатам данного этапа были получены следующие данные: рН – 11,4; ХПК – 355 мгО₂/л.

Следующим этапом исследования было произведено озонирование разбавленной сточной воды. Подробная установка приведена в работе [7]. Объем раствора – 150 мл, время обработки – 30 минут. В результате были получены следующие данные: рН – 11,5; ХПК – 375 мгО₂/л.

На рис. 1 представлена сравнительная диаграмма полученных значений ХПК.



1 – разбавленный сток (1:100), 2 – после электрохимического окисления,
3 – после озонирования

Рисунок 1 – Сравнительная диаграмма значений ХПК без и с различными методами окисления СЩС

Анализ полученных данных показывает, что данные методы имеют достоинства – не требуют дополнительных реагентов, а соответственно, и затрат и являются экологически чистыми. С их помощью получилось снизить ХПК в 2 раза, что говорит о частичном удалении органических загрязняющих веществ.

Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего изучения и усовершенствования условий проведения экспериментов с целью получения наиболее эффективных методов очистки сточных вод и применения их в будущем.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения озонирования и электроокисления в качестве эффективных технологий для очистки сернисто-щелочных сточных вод, что в дальнейшем способствует улучшению состояния экологии и охране водных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баландина А. Г. и др. Анализ воздействия предприятий нефтехимического комплекса на гидросферу и пути минимизации их негативного влияния // Башкирский химический журнал. 2015. Т. 22. № 1. С. 115-126.
2. Будник В. А., Бобровский Р. И., Бабкин Д. Е. Комплексные методы очистки сернисто-щелочных сточных вод нефтеперерабатывающих производств // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2019. № 5. С. 58-85.
3. Савельев С. Н. и др. Исследование очистки сернисто-щелочных сточных вод и медьсодержащих отработанных гальванических растворов химическими методами // Вода: химия и экология. 2018. № 1-3. С. 55-61.

4. Кулебякина А. И. и др. Об оценке эффективности процесса высокоинтенсивного окисления // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 11. С. 104-110.

5. Вода. Метод определения химического потребления кислорода: ГОСТ 31859-2012. Введен 01.01.2014 / Москва: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ. 2014. 7 с.

6. Kuznetsov V. V. et al. Study of the process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2 E)-2-[(5-Nitro-2-furyl) methylene] hydrazine Carboxamide) // Water. 2023. Т. 15. №. 19. С. 3370.

7. Емжина В. В., Иванцова Н. А., Кручинина Н. Е. Озонирование активных фармацевтических субстанций в присутствии пероксида водорода // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 4. С. 81-85.

УДК 628.316.12

А.А. Извекова, асп.; Е.Ю. Квиткова, науч. сотр, канд. хим. наук;

А.А. Гущин, проф. д-р хим. наук (ФГБОУ ВО «ИГХТУ», г. Иваново, РФ)

ОЧИСТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ХЛОРАМФЕНИКОЛА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

Загрязнение водоемов потенциально опасными веществами, включая фармацевтические препараты (ФП) и средства личной гигиены, остается одной из актуальных проблем современности, вызывающей серьезное беспокойство у научного сообщества и экологических организаций [1]. Первые случаи обнаружения ФП в водной среде и питьевой воде датируются 1980-ми годами [2]. С течением времени количество таких исследований увеличивается, подтверждая распространение данных веществ и их потенциальное воздействие на экосистемы и здоровье человека [3].

Основными путями проникновения ФП в окружающую среду являются использование населением фармацевтических препаратов, утилизация через канализационные системы, сбросы сточных вод фармацевтическими предприятиями, а также дренаж медицинских отходов. Исследования показывают, что традиционные методы очистки стоков недостаточно эффективны для удаления ФП, что ведет к попаданию загрязняющих веществ в водоемы без надлежащей обработки. Например, некото-

рые широко распространенные лекарственные средства, такие как ибупрофен, парацетамол, а также антибиотики левомецетин и тетрациклин, встречаются в значительных концентрациях в поверхностных водах, что создает серьезные риски для экологической безопасности и здоровья населения. Согласно результатам крупного исследования, проведенного учеными Йоркского университета, наиболее распространенным ФП являются гормоны и антибиотики, которые были обнаружены в 75% изученных проб благодаря их широкому применению и стойкости к разложению [4].

Усугубляет проблему тот факт, что многие из этих соединений характеризуются низкой биоразлагаемостью и способны аккумулироваться в водных источниках, создавая долговременную угрозу. Дополнительно возрастает риск появления устойчивых к антибиотикам бактерий из-за наличия остаточных количеств лекарств в водной среде. Современные технологии водоочистки пока не обеспечивают полного удаления данных соединений из сточных вод [5], поэтому необходимы инновационные подходы к нейтрализации фармацевтических примесей в стоках. В частности, плазменные технологии, включая применение диэлектрического барьерного разряда (ДБР), считаются перспективным методом для эффективной очистки воды от фармацевтических загрязнений [6]. Плазмохимические технологии относятся к современным окислительным методам, которые основаны на использовании высокоактивных гидроксильных радикалов и имеют высокую эффективность удаления органических соединений из воды.

В данной работе рассмотрена возможность применения ДБР для очистки воды от ФП (на примере хлорамфеникола). Хлорамфеникол (Торговое название – левомецетин) – антибиотик широкого спектра действия. Для приготовления модельных растворов использовался левомецетин, выпускаемый ЗАО «Производственная фармацевтическая компания Обновление».

Эксперимент проводился на установке, основным элементом которой является плазмохимический реактор с коаксиальным расположением электродов, описание конструктивных особенностей и принципа действия которого приведено в работе [6]. Оптимальными условиями обработки водных растворов хлорамфеникола в плазме диэлектрического барьерного разряда, являются: приложенное к электродам напряжение – 13 кВ (вкладываемая мощность в разряд – 11,61 Вт), время контакта раствора с зоной разряда – до 5 секунд.

Содержание хлорамфеникола в пробах осуществлялось путем его извлечения из водных растворов методом экстрагирования органическим растворителем – этилацетатом с последующим спектрофотометрированием (спектрофотометр «UNICO, мод. 2804»).

Процесс деструкции хлорамфеникола в реакторе ДБР протекает достаточно эффективно (степень разложения достигает 85 %). Эффективность очистки водных растворов от хлорамфеникола (α) оценивалась по формуле:

$$\alpha(\%) = \frac{C_{\text{нач}} - C}{C_{\text{нач}}} \cdot 100 \quad (1)$$

где $C_{\text{нач}}$ и C — начальная концентрация хлорамфеникола на входе в реактор и на выходе из него соответственно.

Исследование показало, что степень деградации хлорамфеникола под воздействием ДБР при начальных концентрациях (C_0) в диапазоне от 9 до 45 мг/л достигает значений 70-85 %. Константа скорости деградации хлорамфеникола (k), рассчитанная на основании кинетической модели для этого диапазона начальных концентраций, снижается вдвое – с $(0,30 \pm 0,03)$ до $(0,16 \pm 0,01) \text{ с}^{-1}$ по мере увеличения начальной концентрации. В то время как скорость процесса деградации W , которая определяется как $W = k \cdot C_0$, возрастает с 8,2 до 22,0 мкмоль/л·с. Сравнение кинетики деградации хлорамфеникола с аналогичными показателями для парацетамола свидетельствует о большей устойчивости хлорамфеникола к разложению в ДБР [7]. Эффективность процесса деградации исследуемого препарата с точки зрения затрат энергии (число разложенных молекул на каждые 100 эВ потребленной энергии) варьируется в пределах от 0,002 до 0,006 молекул/100 эВ, что существенно меньше соответствующих показателей для парацетамола в аналогичных условиях (от 0,015 до 0,022 молекул/100 эВ) [7].

Анализ продуктов разложения хлорамфеникола в водной среде выявил присутствие альдегидов, карбоновых кислот, аммонийного азота, а также нитритных и нитратных ионов. Увеличение продолжительности воздействия плазмы на раствор привело к повышению уровня альдегидов, ионов аммония (NH_4^+) и нитратов (NO_3^-). Установлено, что от 12,2% до 25,3% углерода, входящего в состав левомицетина, превращается в CO_2 . Степень минерализации исходного соединения увеличивается прямо пропорционально снижению его начальной концентрации в растворе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что технология очистки сточных вод при помощи ДБР является перспективным методом

для удаления фармацевтических веществ, таких как хлорамфеникол, из водных сред.

*Работа выполнялась в рамках государственного задания
на выполнение НИР: тема № FZZW-2023-0010*

ЛИТЕРАТУРА

1. Comber S. et al. Active pharmaceutical ingredients entering the aquatic environment from wastewater treatment works: a cause for concern? // Science of the total environment. – 2018. – Т. 613. – С. 538-547.
2. Richardson M. L., Bowron J. M. The fate of pharmaceutical chemicals in the aquatic environment // Journal of Pharmacy and Pharmacology. – 1985. – Т. 37. – №. 1. – С. 1-12.
3. Datel J. V., Hrabankova A. Pharmaceuticals load in the svihov water reservoir (Czech Republic) and impacts on quality of treated drinking water // Water. – 2020. – Vol. 12. – No. 5. – P. 1387.
4. Wilkinson J. L. et al. Pharmaceutical pollution of the world's rivers // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 119. – No. 8. – P. e2113947119.
5. Yang H. et al. Residues, bioaccumulation, and trophic transfer of pharmaceuticals and personal care products in highly urbanized rivers affected by water diversion // Journal of hazardous materials. – 2020. – Т. 391. – С. 122245.
6. Gushchin A. et al. Reducing the Toxicity of Tetracycline Solutions and the Kinetics of Decomposition under the Action of DBD in Oxygen // Plasma Medicine. – 2019. – Vol. 9. – No. 2.
7. Ignatiev, A. A., Gushchin, A. A., Grinevich, V. I., Kvitkova, E. Y., Izvekova, A. A., & Rybkin, V. V. // High Energy Chemistry. 2023. 57(6), P. 522-526.

УДК 504.06

А.Р. Шагиахметова, асп.; Т.Ю. Гумеров, проф.
(ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ВАЛОРИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Вода, почва и воздух представляют собой три основные экологические экосистемы и природные ресурсы планеты Земля. За последнее столетие в эпоху индустриализации и развития тяжелой промышленности, возникла экологическая проблема, связанная с серьезными загрязнениями, которых раньше не было.

Сточные воды, твердые отходы и выбросы в атмосферу – рассматриваются как наиболее важные источники загрязнения на Земле. Излишние шумы, свет и тепловое загрязнение определены как факторы, представляющие экологическую опасность и влияющие на здоровье и благополучие человека.

Чуть более двух третей планеты покрыто водой, в то время как только 3 % воды на Земле пресная и около 0,5 % легко доступны для использования (озера, реки, ручьи и); остальная фракция недоступна для непосредственного использования (ледники, загрязненная вода). В настоящее время наибольшее использование пресной воды приходится на ирригацию и сельское хозяйство, хотя многие страны страдают от нехватки воды. Ежегодно образуется 380 млрд м. куб. городских сточных вод, и ожидается, что через 25 лет этот показатель увеличится примерно в два раза. Большая часть этих сточных вод до сих пор сбрасывается в открытые водоемы в неочищенном виде.

Помимо сточных вод, твердые отходы являются еще одним источником загрязняющих веществ, образующиеся в виде бытовых, промышленных, пищевых производств и сельского хозяйства. В основном это органические соединения и некоторая часть неорганических: пластик, стекло, металлы, бумага. Обработка отходов, например, на свалках, может дополнительно привести к загрязнению грунтовых вод фильтраатами свалок.

Источником загрязняющих веществ является промышленный сектор с наибольшим количеством отходов, в основном в результате строительства и запуска новых технологий. На муниципальные отходы приходится около 10 % от общего объема производимых отходов, а это означает, что на одного человека в год образуется около 530 кг. Отходы в основном вывозятся на свалки, сжигаются, перерабатываются или компостируются, но основная цель экологической концепции сводится к минимизации их накопления и, насколько это возможно, максимально увеличить переработку, повторное использование и повышение ценности.

Наряду с загрязнителями воды и твердыми отходами, загрязнение воздуха является одной из самых значительных проблем для здоровья населения и окружающей среды. Загрязнение воздуха связано с образованием летучих загрязняющих веществ: парниковые газы (CH_4 или CO_2 , NO_x), а также другие токсичные неорганические и органические летучие соединения.

В процессе очистки сточных вод при биологической очистке выделяется некоторое количество парниковых газов, т.е. CO_2 , CH_4 , N_2O , в то время как косвенные выбросы в основном связаны с выработкой электроэнергии за пределами предприятия, способствующие значительному образованию CO_2 . Аммиак выделяющийся из сточных вод может быть сокращен путем замены традиционных процессов нитрификации-денитрификации процессами Анаммокса (анаэробное окисление аммония). Выбросы N_2O являются результатом нитрификации-денитрификации азотных соединений. При анаэробном разложении органического вещества выделяется метан в процессе вторичной анаэробной очистки, в канализационной системе или на иловых линиях. Это приводит к выбросам соединений с резким запахом (H_2S , SO_x). Некоторые летучие органические соединения образуются на очистных сооружениях сточных вод и часто образуются в результате испарения, например в аэробных аэротенках с активным илом. Это могут быть алифатические или ароматические соединения, природа и концентрация которых во многом зависят от происхождения и состава сточных вод.

Технологии, связанные с очисткой загрязнителей в окружающей природной среде с использованием биологических или небιологических процессов постоянно разрабатываются, оптимизируются и применяются в течение многих десятилетий. Тем не менее, последние тенденции и подходы в большей степени сосредоточены на валоризации загрязняющих веществ, их повторном использовании и восстановлении ресурсов из первоисточников. Последние рассматриваются как ценные ресурсы, а не как загрязнители, подлежащие уничтожению (валоризация – это процесс превращения отходов в более полезные продукты).

С точки зрения восстановления ресурсов, в среднем сточные воды содержат 16,6 млн тонн азота, 6,3 млн тонн калия и 3,0 млн тонн фосфора. Их можно восстановить, одновременно уменьшая проблемы эвтрофикации. Это позволит решить проблему возможного и прогрессирующего дефицита фосфора, азота, калия, в основном получаемых из невозобновляемых минеральных ресурсов. Органические соединения, присутствующие в сточных водах, могут быть преобразованы в биогаз, богатый метаном, который при восстановлении, можно использовать в качестве ценного источника энергии.

Загрязнители сточных вод, возможно, преобразовать в биотопливо, такое как биодизель или водород, в биопродукты – простые соединения – короткоцепочечные и среднецепочечные карбоновые кислоты (напри-

мер, ацетат, пропионат, бутират, валерат, капроат), более ценные коммерческие соединения, такие как биополимеры (биопластики) или одноклеточные белки. Сточные воды также являются важным ресурсом сами по себе, поскольку они могут быть очищены и повторно использованы, например для орошения и промышленного использования.

Отходы являются потенциально ценным ресурсом. Часть неорганической фракции отходов может быть переработана, в то время как органическая фракция может разлагаться и выделять газы, такие как метан и углекислый газ, которые могут выделяться в виде парниковых газов, участвующих в изменении климата. Однако, как и в случае со сточными водами, эта органическая фракция может быть обогащена и восстановлена в виде биогаза (метана), используемого в качестве биотоплива. Компостирование и вермикомпостирование являются другими жизнеспособными вариантами повышения ценности органических отходов. При вермикомпостировании микроорганизмы и черви превращают органические отходы в богатые питательными веществами гумус и удобрения для применения в сельском хозяйстве. Совсем недавно было показано, что «черные солдатики» растут на органических отходах и используют их питательные вещества. Они являются потенциальным источником белков, органических удобрений, а также могут производить другие биопродукты. Органические отходы могут быть биопреобразованы в короткоцепочечные летучие жирные кислоты (например, ацетат) или среднецепочечные карбоновые кислоты (например, капроат).

Метаболиты, полученные из сточных вод или из твердых отходов, такие как эти жирные кислоты, могут быть (био) преобразованы на второй стадии в другие, более или очень ценные конечные продукты, например, микробные масла или другие метаболиты, накопленные дрожжами, прямая биоконверсия отходов в биоэтанол или процессы термохимической переработки отходов для рекуперации энергии.

Валоризация выбросов газов из сточных вод и отходов, а также их очистных сооружений практически не исследована. Выбросы газов (CO , CO_2) в сталелитейной промышленности дают возможность производить жирные кислоты, биоспирты (этанол, бутанол, гексанол) и множество других биопродуктов, что демонстрирует потенциал валоризации газа в промышленном секторе, а также во многих других, таких как сектор сточных вод и отходов.

Таким образом, валоризация загрязняющих веществ в области водоснабжения, сточных вод и утилизации отходов место для многих ин-

тересных дополнительных исследований. Ожидается, что в краткосрочной перспективе появятся много интересных исследовательских данных и научной информации в этой области, основанной на экологически чистых и устойчивых подходах к циркулярной биоэкономике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christian Kennes. The grand challenge of water, waste, wastewater and emissions engineering and valorization [Электронный ресурс] // Frontiers in Environmental Engineering. 07.02.2023. URL: <http://www.frontiersin.org/journals/environmental-engineering/articles/10.3389/fenv.2023.1149950/full> (дата обращения: 19.01.25).

2. Массеров, Д.А. Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий [Электронный ресурс] // Отходы и ресурсы. 2021. Т 8. №2. URL: <https://resources.today/PDF/06ECOR221.pdf>. (дата обращения: 20.01.2025).

3. Valorization of residual yoghurt whey by lactic acid production: An optimized process [Электронный ресурс] // Journal of International Academy of Refrigeration. 2016. No. 3. P. 13-17.

УДК 338.436.33:504.064.2

И.В. Яковлев, асп.;

А.К. Горелкина, проф., д-р техн. наук (КГУ, г. Кемерово, Россия)

БУФЕРНОСТЬ ПОЧВЫ И ЕЁ ПОДДЕРЖАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРНЯ ПОСЛЕ СЖИГАНИЯ

Буферность почвы – это её способность поддерживать относительное постоянство рН, а также уровень питательных веществ при внесении удобрений или других веществ. Эта характеристика почвы важна для здоровья растений и экосистемы в целом. Буферные свойства почвы зависят от её состава, в частности от содержания глин, органических веществ и карбонатов.

Одним из методов улучшения буферности почвы является использование золы растительных остатков (полевых отходов), а также другие методы управления, такие как внесение органических веществ и применение удобрений. Использование растительной золы в сельском хозяйстве является крайне полезной практикой, способной значительно улучшить качество почвы и повысить урожайность сельскохозяйственных

культур. Зола, образуемая в результате сжигания растительных материалов, содержит множество ценных питательных веществ, таких как калий, кальций, магний и фосфор. Эти элементы играют ключевую роль в поддержании здоровья растений и хорошего состояния почвы [1-2].

Одним из основных преимуществ золы является её способность увеличивать уровень pH почвы. Многие сельскохозяйственные культуры требуют определенного уровня кислотности для оптимального роста. Внесение золы может эффективно помочь в борьбе с чрезмерной кислотностью, восстанавливая баланс pH и создавая более благоприятные условия для развития корневой системы растений. Это, в свою очередь, способствует лучшему усвоению питательных веществ и повышает их доступность для растений. Помимо изменения pH, зола также активно участвует в процессе формирования гумуса. Гумус играет критическую роль в улучшении структуры почвы, повышая её водоудерживающие свойства и обогащая почву органическими веществами. Более высокий уровень гумуса способствует удержанию влаги и питательных веществ, что важно для устойчивости растений к засушливым условиям. Кроме того, наличие гумуса улучшает аэрируемость почвы, что позволяет корням растений лучше дышать и усваивать кислород [3].

Зола также обогащает почву кальцием и магнием, которые являются биогенными элементами для формирования прочной структуры почвы. Эти минералы помогают предотвратить такие проблемы, как уплотнение и эрозия, позволяя почве оставаться плодородной и жизнеспособной. Более того, кальций и магний улучшают обмен веществ в растениях, способствуя активному росту и развитию.

Не менее важным является влияние золы на микробиологическую активность в почве. Зола может создать более благоприятные условия для существования почвенных микроорганизмов, которые играют незаменимую роль в разложении органических веществ и минерализации элементов питания. Повышение биологической активности, вызванное внесением золы, приводит к улучшению качества почвы и её свойств.

Для успешного применения золы в сельском хозяйстве важно учитывать несколько факторов. Перед внесением золы в почву стоит провести анализ её состояния, чтобы определить необходимое количество и соотношение макро- и микроэлементов. Дозы рассчитываются на основании планируемого урожая и содержания элементов питания в почве. Зола лучше всего равномерно распределять по поверхности почвы в сухом состоянии, а затем заделывать в почву, что позволит избежать по-

терь питательных веществ и оптимизировать их доступность для растений [4].

Следует также учитывать, что зола будет наиболее эффективна в сочетании с другими органическими удобрениями, такими как компост или навоз. Это способствует комплексному обогащению почвы, а также улучшает её физические и химические свойства. В конечном счете, использование золы как удобрения может существенно повысить урожайность сельскохозяйственных культур и улучшить общую продуктивность сельскохозяйственных земель [5-6].

Для поддержания буферности почвы с использованием золы и других материалов следует проводить регулярные анализы почвы для определения уровня pH и содержания питательных веществ. Вместе с золой можно использовать компост, который улучшает структуру почвы и увеличивает её органическое содержание. Это многофункциональный способ увеличения буферности и поддержания здоровья почвы.

Зола растительных остатков проявляет многофункциональные свойства, благодаря высокому содержанию калия, кальция и других микроэлементов, которые вносят вклад в улучшение структуры почвы и стабилизацию её кислотно-щелочного баланса. Это, в свою очередь, повышает не только плодородие, но и устойчивость почвы к неблагоприятным климатическим условиям.

В совокупности с золой компост представляет собой ценный ресурс, который способствует увеличению органического содержания почвы. Компост не только активизирует биологические процессы и увеличивает численность полезных микробов, но также улучшает физические характеристики почвы, способствуя удержанию влаги и оптимальному дренажу. При его внесении происходит медленное высвобождение питательных веществ, что обеспечивает долгосрочное питание растений и минимизирует риски их истощения.

Важно отметить, что эффективное управление состоянием почвы требует комплексного подхода. Регулярный мониторинг состояния почвы является необходимым условием для адаптации агрономических практик в соответствии с изменениями в экосистеме, что в свою очередь создает предпосылки для достижения высокой урожайности и стабильности в сельскохозяйственном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудяров В.Н., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рацио-

нальному использованию // Агрохимия. 2017. № 6. С. 3–11. 2.

2. Сычев В.Г., Лунев М.И., Павлихина А.В. Современное состояние и динамика плодородия пахотных почв России // Плодородие. 2012. № 4(66). С. 5–7. 3.

3. Тлеукенова С. У., Ишмуратова М. Ю. Изучение влияния внесения биоугля на pH почвы. – 2017.

4. Ушаков Р. Н. и др. Некоторые параметры устойчивости агроэкосистем // Агрохимия. – 2019. – №. 4. – С. 11-22.

5. Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1 (94). С. 1–4. 4.

6. Фрид А.С. Методология оценки устойчивости почв к деградации // Почвоведение. 1999. № 3. С. 399–404.

УДК 628.16.094.3-926.214, 66.087.3

Е.А. Сахно, студ.; Н.А. Иванцова, доц., канд. хим. наук
(РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НИТРОФУРАЛА С ПОМОЩЬЮ ОЗОНИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЯ

Загрязнение окружающей среды фармацевтическими отходами – серьезная мировая проблема, опасная для экологии и здоровья людей. Даже небольшие дозы лекарственных и косметических средств способны оказывать негативное воздействие на природные системы и организм человека [1].

Сточные воды фармацевтических предприятий образуются в различных стадиях производства: при подготовке сырья, в технологических процессах получения лекарственных препаратов и промежуточных продуктов, при регенерации и утилизации растворителей, а также при очистке газовых выбросов водой. Кроме того, сточные воды образуются в процессах фильтрации, экстракции, химической очистки препаратов и при промывке оборудования [2].

Для разложения фармацевтических препаратов возможно применение методов высокоинтенсивного окисления, которые основаны на активации озона, пероксида водорода или персульфата [3]. Озон демонстрирует высокую окислительную способность в отношении органических и неорганических веществ благодаря своему окислительному потенциалу 2,07 В [2]. Он эффективно окисляет органические соединения

при комнатной температуре, любых концентрациях и значениях pH [4]. В реакциях с органическими молекулами O_3 атакует двойные связи и активированные ароматические структуры [5]. Озонирование сточных вод не приводит к образованию осадков и не требует регенерации. Электрохимическое окисление обеспечивает удаление нитросоединений из сточных вод, но имеет ограничения, связанные с необходимостью использовать специальные установки, периодичностью, высокими затратами энергии и риском образования токсичных побочных продуктов.

Объектами исследования являлись модельные водные растворы нитрофурала (активного вещества фурацилина), произведенного «ИРБИТСКИМ ХФЗ». Нитрофурал (фурацилин) – мелкокристаллический порошок желтого или зеленовато-желтого цвета без запаха с горьким вкусом, является противомикробным средством с наружным или местным действием. Имеет молекулярную формулу $C_6H_6N_4O_4$ с молярной массой 198,136 г/моль. Нитрофураны были получены из 2-замещенного фурана присоединением к нему нитрогруппы в пятом положении [3]. В случае низких концентраций (до 100 мг/л) органических нитросоединений в сточных водах целесообразно применение деструктивных методов очистки, таких как электроокисление и озонирование [4]. Для приготовления растворов таблетку фурацилина измельчали, взвешивали необходимое количество в пересчете на нитрофурал, и затем растворяли в дистиллированной воде с помощью магнитной мешалки 10-15 минут до полного растворения антисептика. Исходная концентрация нитрофурала варьировалась в диапазоне 5-25 мг/л. Концентрацию определяли спектрофотометрически, измеряя оптическую плотность растворов при 375 нм.

Озонирование проводили на лабораторной установке, состоящей генератора озона производительностью 1000 мг/ч, колонны озонирования, деструктора озона, подробное описание изложено в [6]. Для электроокисления использовали платинированные титановые аноды на установке, состоящей из источника постоянного тока DAZHENG PS-305D, анода, катода, мешалки, емкости с исследуемым раствором [7]. Во всех опытах электролиз проводился при токе 0,1 А, электролитом выступал NaCl, содержащийся в составе таблетки.

На рис. 1 представлены результаты окисления нитрофурала при различных исходных концентрациях озоном. Установлено, что с увеличением исходной концентрации нитрофурала в 12,5 раз (от 2-25 мг/л) эффективность его деструкции при времени обработки 20 мин снижается в 2,2 раза. Однако через 60 мин обработки (во всех случаях) степень

очистки от лекарственного вещества составила более 95%.

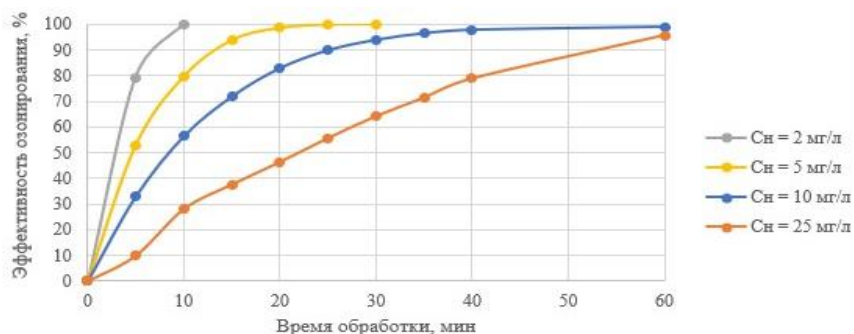


Рисунок 1 – Зависимость эффективности озонирования нитрофурала от времени обработки

На рис. 2 представлены результаты исследования электроокисления нитрофурала. При электроокислении водного раствора нитрофурала полная деструкция (степень очистки более 98 %) его водного раствора содержащего 2 и 5 мг/л достигается через 20 мин электролиза. В случае обработки более высоконцентрированных растворов – 10 и 25 мг/л – максимальная эффективность электроокисления (при времени обработки 60 мин) составила 98 и 80 % соответственно.

В данной сравнительной оценке эффективности очистки воды от нитрофурала с использованием методов озонирования и электроокисления были проанализированы ключевые аспекты каждого из этих методов.

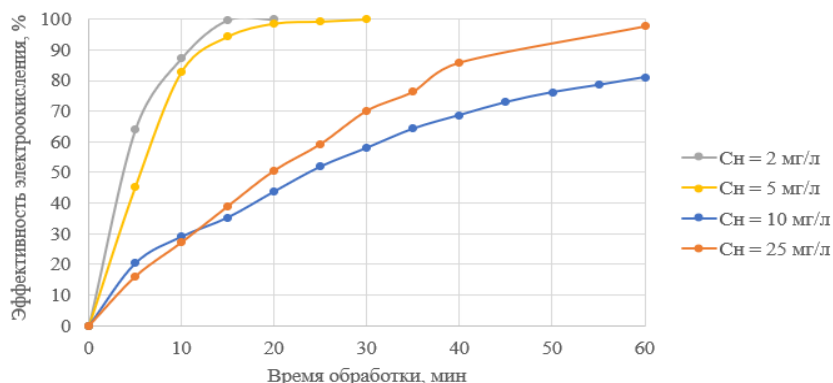


Рисунок 2 – Зависимость эффективности электроокисления нитрофурала от времени обработки

Озонирование показало высокую эффективность в разрушении нитрофурала благодаря мощному окислительному действию озона. Процесс позволяет достигать значительного снижения концентрации вещества в воде за короткие промежутки времени. Однако, озонирование требует тщательного контроля дозировки озона и может привести к образо-

ванию побочных продуктов. С другой стороны, электроокисление также зарекомендовало себя как перспективный метод очистки. Этот метод отличается низкими затратами на оборудование и энергоресурсы, но скорость процесса может говорить о необходимости удлинения времени обработки.

В итоге, выбор между озонированием и электроокислением должен основываться на конкретных условиях, таких как содержание нитрофура в воде, требуемая степень очистки и экономическая составляющая. Рекомендуется дальнейшее исследование обеих технологий для оптимизации процессов и повышения их эффективности в удалении синтетических загрязнителей из водных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang, F. Application of ozone-catalyzed oxidation process for degradation of pharmaceuticals and personal care products // *Frontiers in Science and Engineering*. – 2024. – Т. 4. – №.8. – С. 45-49.
2. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. – 2003. – Т. 2. – 883 с.
3. Koundle P. et al. Tetracycline degradation for wastewater treatment based on ozone nanobubbles advanced oxidation processes (AOPs) – Focus on nanobubbles formation, degradation kinetics, mechanism and effects of water composition // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – Т. 501. – С. 156236.
4. Белов С. Г., Наумчик Г. О. Исследование деструкции нитрозамещённых органических веществ в водных растворах при озонировании // *Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. – 2016. – №. 2. – С. 54-58.
5. Sharma V. K. Oxidative transformations of environmental pharmaceuticals by Cl_2 , ClO_2 , O_3 , and Fe (VI) : kinetics assessment // *Chemosphere*. – 2008. – Т. 73. – №. 9. – С. 1379-1386.
6. Каратаева П.Р., Иванцова Н.А. Каталитическое озонирование водного раствора парацетамола // *Экологическая химия*, 2022, Т.31, № 1, с. 34–39.
7. Kuznetsov V.V., Kuzin E.N., Ivantsova N.A., Pirogov A.V., Mezhuiev Y.O., Filatova E.A., Averina Y.M. Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2E)-2-[(5- Nitro-2-furyl)methylene]hydrazine Carboxamide) // *Water*. 2023. Vol. 15. Art. № 3370/

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ НИТРОФУРАЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ

В 1980-х годах для очистки питьевой воды были предложены совершенствованные процессы окисления (Advanced Oxidation Processes – AOPs), а позже они были широко изучены и используются сейчас в качестве альтернативного метода для очистки различных сточных вод, в том числе, от органических соединений медицинских препаратов.

Во время такой очистки сточных вод гидроксильные радикалы ($\text{OH}\cdot$) или сульфатные радикалы (SO_4^{2-}) образуются в таком количестве, которого достаточно для удаления загрязняющих веществ [1].

Хорошие результаты показывает фотокаталитическое окисление. Фотокатализ – это раздел химии, изучающий химические реакции, протекающие в присутствии света и фотокатализатора. Фотокатализатор – это полупроводник, который ускоряет реакцию своим присутствием. Этот метод является экологически химическим процессом, поэтому он необходим в наши дни [2].

В данной работе в качестве фотокатализаторов будут использоваться графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), обладающий высокой термической стабильностью, и Digussa P25 (TiO_2), синтезированного гидролизом тетрахлорида титана. При поглощении фотона диоксидом титана, его электрон из валентной зоны может быть переведен в зону проводимости, образуя электронную вакансию – «дырку». Электроны и «дырки» мигрируют к поверхности катализатора, где участвуют в окислительно-восстановительных реакциях с частицами различного вида, адсорбированными на поверхности [3-4].

Объектами исследования являются водные растворы действующего вещества лекарственного препарата фурацилина – нитрофурала. Приготовление раствора нитрофурала основывалось в измельчении и растирании таблетки фурацилина и дальнейшем взвешивании необходимой массы препарата и растворении его в воде. Полученный раствор перемешивали на магнитной мешалке до полного растворения исследуемого компонента в течение 15 мин. Исходная концентрация нитрофурала во всех опытах была 10 мг/л. Исследования по фотоокислению модельных водных растворов нитрофурала проводили в фотореакторе произведе-

ля ООО «Научно-Производственное Предприятие «Мелитта» (Россия)», подробное описание которого изложено в [5]. В качестве источника УФ-излучения использовали импульсную ксеноновую лампу (ИКЛ). Эффективность фотоокисления нитрофурала оценивали по прямой спектрофотометрии (СФ-2000) по снижению пиков. Методика фотокаталитических исследований заключалась в следующем: в стакан помещали 100 мл водного раствора нитрофурала с заданной концентрацией и помещали под источник УФ – излучения и облучали при непрерывном перемешивании. После обработки растворы направляли в центрифугу на 10 мин при 300 оборотах для отделения катализатора. Для полученного раствора получали спектры поглощения в диапазоне длин волн 200-500 нм.

Первым этапом исследования была оценка эффективности снижения концентрации нитрофурала от времени обработки при отсутствии какого-либо катализатора (рис. 1).

Установлено, что с увеличением времени фотолиза (от 5-40 мин) происходит снижение характерных для нитрофурала пиков при длинах волн 260 и 370 нм, что указывает на достаточно эффективную деструкцию лекарственного препарата. Максимальная эффективность при длине волны 260 нм составила 72%, при длине волны 370 нм – 85 %.

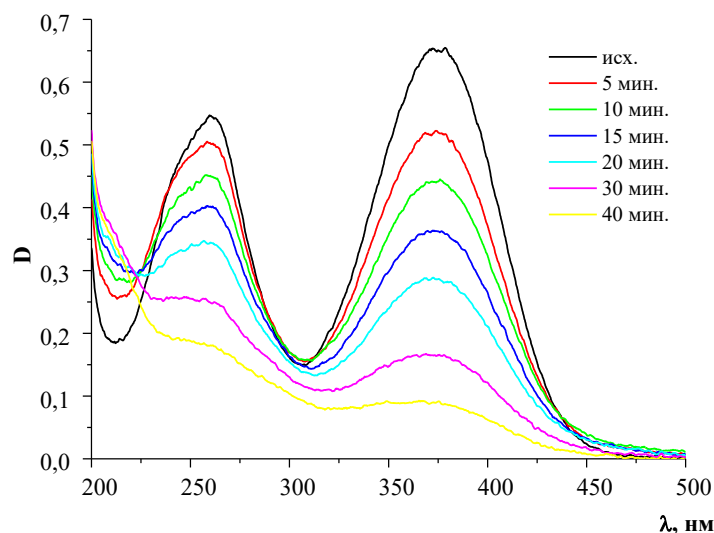


Рисунок 1 – Фотодеструкция модельного раствора нитрофурала в отсутствии катализаторов

Вторым этапом исследования была сравнительная оценка возможности применения фотокатализаторов нитрида углерода (НУ), полученного по технологии, описанной в [6] и коммерческого Degussa P25 (Deg)

для разложения нитрофурала (рис. 2, 3). Время обработки было выбрано 5 мин, дозы катализаторов от 0,01 до 0,08 гр на 100 мл пробы.

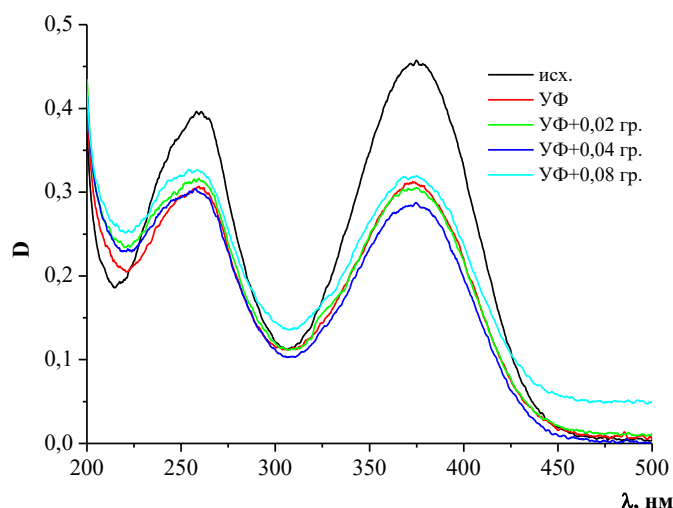


Рисунок 2 – Фотодеструкция модельного раствора нитрофурала в присутствии катализатора нитрида углерода

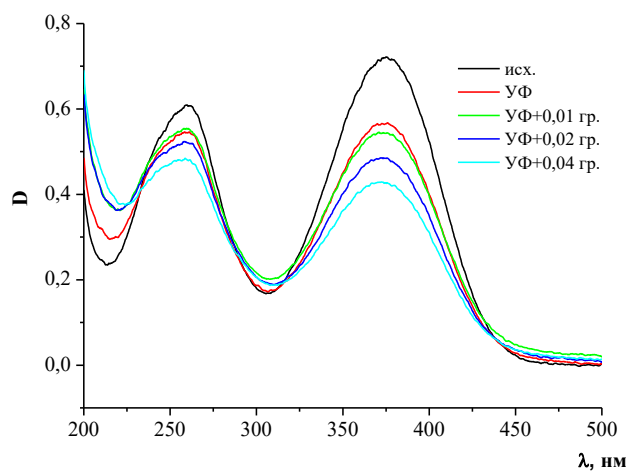


Рисунок 3 – Фотодеструкция модельного раствора нитрофурала в присутствии катализатора Degussa P25

Установлено (рис. 2, 3), что за 5 мин УФ-обработки при увеличении дозы катализатора практически не влияет на эффективность снижения концентрации нитрофурала. Коммерческий катализатор Degussa P25 проявил большую активность по сравнению с НУ. Эффективность деструкции нитрофурала при 5 мин обработки, дозе катализатора 0,04 гр при чистом фотолизе составила 30 %, при УФ/НУ – 40 %, при УФ/Deg – 45 %. Возможно при увеличении времени обработки до 30-40 мин эф-

эффективность работы фотокатализаторов увеличит снижение концентрации загрязнителя.

В ходе исследования каталитической деструкции нитрофурала под воздействием ИКЛ было установлено, что применение катализаторов, таких как нитрид углерода и продукты компании Degussa, несколько усиливает эффективность данного процесса. Однако необходимы дальнейшие детальные исследования в этой области. Результаты исследования подчеркивают важность выбора подходящих катализаторов для оптимизации процессов фотодеструкции, что открывает новые горизонты для дальнейших научных разработок в области очистки окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэн Ю., Чжао Р. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment/ Water Pollution (S Sengupta, Section Editor). – 2015. – Vol. 1. – P. 167-176.
2. Rakshit Ameta, Meenakshi S. Solanki, Surbhi Benjamin, Suresh C. Ameta. Chapter 6 – Photocatalysis. Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment // Emerging Green Chemical Technology. – 2018. – P. 135-175.
3. Barrio J. Photoactive carbon nitride from melamine hydrochloride supramolecular assembly / J. Barrio, M. Shalom// Materials science in semiconductor processing. – 2018. – Vol. 73. – P. 78-82.
4. Агафонов А. В., Редозубов А. А., Козик В. В., Краев А. С.. Фотокаталитическая активность нанопорошков диоксида титана, полученных золь–гель методом при различных значениях pH // Журнал неорганической химии. – 2015. – Т. 60. – № 8. – С. 1001–1008.
5. Шлыкова А. Ю., Дубровина В. Н., Кулебякина А. И., Иванцова Н. А. Кинетика деструкции метиленового синего под воздействием импульсной ксеноновой лампы // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2024. – Вып. 3. – С. 136-145.
6. Ветрова М.А., Иванцова Н.А., Дубровина В.Н., Курбатов А.Ю. Исследование эффективности катализаторов на основе нитрида углерода для очистки воды от компонента биоцида // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2024. – № 6(321). – С. 49-55.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОКИСЛЕНИЯ РЕЗОРЦИНА МЕТОДОМ ОЗОНИРОВАНИЯ

Загрязнение водоемов сточными водами является одной из наиболее острых экологических проблем современности. Сточные воды, содержащие разнообразные загрязняющие вещества, включая органические и неорганические соединения, патогенные микроорганизмы, тяжелые металлы, попадают в реки, озера и моря, нанося значительный вред экосистемам. Это приводит к ухудшению качества воды, что негативно сказывается на здоровье человека и живых организмов. Особенно остро проблема стоит в районах, где недостаточная инфраструктура для очистки сточных вод, что приводит к их сбросу в водоемы с превышением нормативов.

Фенолы и их производные являются одними из самых распространенных поллютантов [1]. Резорцин – двухатомный фенол, представляет собой серьезную экологическую проблему, особенно в регионах с развитой химической и фармацевтической промышленностью. В процессе производства часто происходит сброс сточных вод, содержащих токсичные соединения. Резорцин может оказывать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Он обладает канцерогенными свойствами, а также вызывает проблемы с работой щитовидной железы. При попадании в водоемы резорцин имеет свойство накапливается в организмах водных сред, что приводит к биомагнификации и потенциально угрожает экосистемам [2].

Чтобы предотвратить дальнейшее загрязнение водоемов, необходимо внедрять современные технологии очистки сточных вод. Сохранение чистоты водоемов имеет критическое значение для экосистем, здоровья человека и устойчивого развития общества в целом.

Современные методы очистки воды от загрязняющих веществ включают в себя разнообразные технологии, такие как озонирование, ультрафиолетовая дезинфекция, электроокисление и другие. Озонирование, как один из наиболее эффективных методов, используется для разрушения органических и неорганических веществ, при этом не образует

токсичных соединений, обеспечивая высокое качество воды и безопасность для здоровья человека [3].

Исследование в данной работе посвящено изучению влияния озона на эффективность окисления резорцина.

Эксперимент проводился на установке, которая включает в себя генератор озона, ёмкость с пробой, деструктор остаточного озона и шланги, соединяющие детали между собой. Расход озono-воздушной смеси для сравнения влияния окисляющей способности озона был выбран от 3 до 5 л/мин. Объём пробы, пошедшей на окисление, 100 мл.

Рабочий раствор резорцина был приготовлен с начальной концентрацией 10 мг/л. Определение содержания резорцина проводили с использованием фотометрического метода. К исследуемой пробе объемом 25 мл приливали 0,25 мл аммиачного буферного раствора, 0,5 мл 1%-ого 4-аминоантипирина и 0,5 мл 10%-ого персульфата аммония, тщательно перемешали. Спустя 15 минут фотометрировали при длине волны $\lambda = 490$ нм относительно холостой пробы.

В результате озонирования резорцина с различными расходами озono-воздушной смеси равными 3, 4 и 5 л/мин были получены данные (рис. 1.), показывающие зависимость эффективности удаления загрязняющего вещества от интенсивности подачи озона.

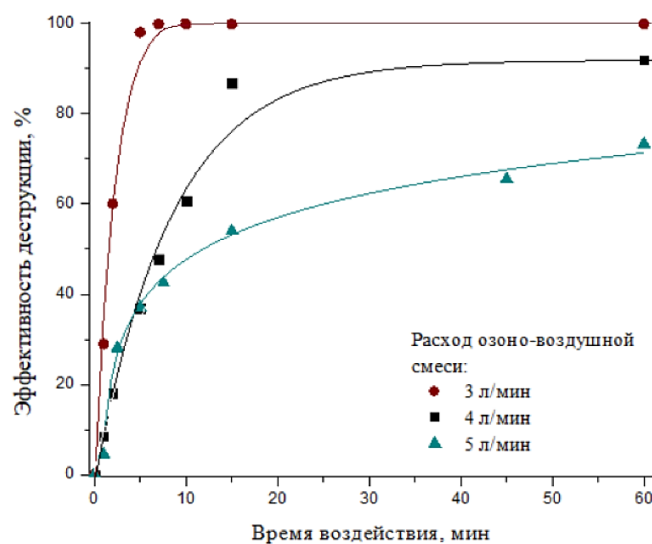


Рисунок 1 – Эффективность деструкции водного раствора резорцина под действием различных расходов озона от времени

При введении в систему дополнительной озono-воздушной смеси значение pH становилось более низким (рис. 2.).

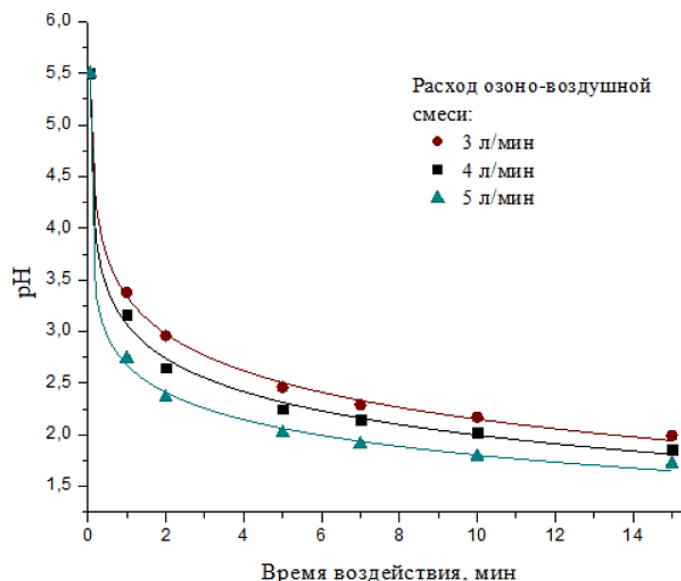


Рисунок 2 – График зависимости pH водного раствора резорцина от времени воздействия озона

Хотя в щелочной среде растворимость озона увеличивается [4], это не оказало сильного влияния на его окисляющую способность и при увеличении расхода озона наблюдалось улучшение процесса деструкции резорцина. Наилучшие результаты были зафиксированы при расходе озона 5 л/мин – уже через 7 минут эффективность достигла 99,9%.

Таким образом, оптимизация расхода озона является значительным фактором для повышения эффективности озонирования, что открывает перспективы для его применения в масштабах водоочистки и водоподготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычёва Е. В. Критерии оценки экологического риска воздействия фенолов на водную экосистему // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2008. – №. 3. – С. 256-261.
2. Кубасова Е. Д., Кубасов Р. В. Современные представления о роли факторов внешней среды и дисбаланса биоэлементов в формировании эндемического зоба // Успехи современной биологии. – 2009. – Т. 129. – №. 2. – С. 181-190.
3. Вертинский А. П. Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика // Инновации и инвестиции. – 2019. – №. 1. – С. 175-182.
4. Фахрутдинова Е. Д. и др. Исследование изменения pH воды при озонировании. – 2013.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КАТАЛИЗ

Постоянно растущая производительность современного общества вносит разнообразие качества жизни, приводящее к загрязнению окружающей среды, которые часто становятся основными причинами экологических проблем. Решение экологических проблем требует целостного подхода, объединяющего более эффективную борьбу с загрязнениями, более чистое производство и более экологичные технологии. Разработка катализаторов, имеющих экологическое значение, играет ключевую роль в решении многих проблем. Каталитические процессы используются для преобразования загрязняющих веществ в воде, почве и воздухе, для производства экологически чистой энергии, сокращения выбросов CO_2 , переработки и повторного использования отходов, а также быстрого обнаружения патогенов в окружающей среде. Все это может быть достигнуто с помощью процессов, которые увеличивают скорость реакций под действием катализаторов с большей эффективностью и селективностью за счет меньшего расхода материала и энергии.

Экологический катализ уже давно применяется в борьбе с загрязнением путем разложения загрязняющих веществ в различных экологических средах. Реагент Фентона является одним из самых известных, наиболее долго используемых методов катализа и используется для окисления загрязняющих веществ или сточных вод в рамках усовершенствованного процесса окисления. Реагент Фентона может использоваться для разрушения органических соединений, таких как трихлорэтилен и тетрахлорэтилен (перхлорэтилен). Гидроксильные радикалы, образующиеся в результате диспропорционирования H_2O_2 с ионами железа в качестве катализатора, используются в качестве усовершенствованного процесса окисления (УПО) для разложения загрязняющих веществ в воде. Аналогичным образом, каталитическая активация персульфата была разработана для получения различных активных форм кислорода и сульфатных радикалов, которые могут быть применены в УПО для разложения различных загрязнителей в воде и почве.

Усовершенствованные восстановительные процессы также были предложены для очистки сточных вод путем получения высокореактивных восстановительных радикалов путем активации восстановителей ультрафиолетовым светом, электронным лучом или ультразвуком, кото-

рые проявляют высокую реакционную способность с определенными загрязнителями в воде.

Катализ обеспечивает специфичность и эффективность, необходимые для борьбы с различными загрязнителями, которые не могут быть легко обработаны с помощью обычных технологий.

Некоторые загрязнители являются биологически активными, даже когда они присутствуют в окружающей среде в чрезвычайно малых концентрациях; к ним относятся различные химические вещества, разрушающие эндокринную систему. Эффективная очистка таких биологически активных микрозагрязнителей до безопасных концентрация, требует специфичности и эффективности, которые можно достичь только катализом.

Ферментативный катализ в форме экологического биокатализа, включает в себя микробные процессы, широко используемые при очистке городских сточных вод. Микробы участвуют в процессах нитрификации и денитрификации для концентрирования избытка азота из воды. Широко практикуется биоремедиация, где микробы метаболизируют загрязняющие вещества почвы и воды, включая хлорированные растворители, полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, пестициды и мышьяк.

Экологический катализ также используется для разложения стойких химических веществ, которые не могут быть легко преобразованы другим способом. Одним из ярких примеров являются «вечные химикаты» (пер- и полифторалкильные вещества (ПФАС)), которые вызывают повышенную обеспокоенность общественности из-за их глобального распространения, устойчивости в окружающей среде, биоаккумуляции и токсичности. Недавние исследования показали эффективность электрохимического окисления в разложении ПФАС в воде. Электрохимическое окисление является одной из форм электрокатализ, в которой анод служит катализатором, облегчающим перенос одного электрона из ПФАС с образованием радикалов, которые в дальнейшем вступают в реакцию с гидроксильными радикалами и другими реакционноспособными веществами, также образующимися на аноде. Обнаружено, что ПФАС эффективно трансформируются в ходе катализируемых ферментами реакций окислительной гумификации и усовершенствованных восстановительных процессах на основе УФ-реакций.

Фотокатализ уже давно является основной темой исследований в области катализа окружающей среды. Многочисленные исследования за

последние несколько десятилетий были сосредоточены на очистке воды с помощью усовершенствованных окислительных процессах, полученных в результате гетерогенного фотокатализа с полупроводниковыми катализаторами, такими как диоксид титана (TiO_2). Исследования в этой области были направлены на улучшение характеристик полупроводниковых катализаторов за счет модификации TiO_2 или использования альтернативных материалов для лучшего использования солнечного излучения и более высокого квантового выхода, хотя их применение, по видимому, отстает, отчасти затрудняемое барьерами передачи технологий.

Использование катализа для борьбы с загрязнением воздуха оказалось чрезвычайно успешным на потребительском рынке. Гетерогенные катализаторы, способные одновременно преобразовывать окись углерода, несгоревшие углеводороды и оксиды азота, уже почти 40 лет используются в трехкомпонентных преобразователях для контроля транспортных выбросов. Технологии каталитической конверсии также были разработаны для контроля выбросов других специфических загрязнителей воздуха, парниковых газов, летучих органических соединений, диоксинов, ароматических углеводородов, а также биогаз со свалок и очистных сооружений. Контроль каталитических выбросов все еще находится в стадии активных исследований для повышения производительности при снижении стоимости.

Экологический катализ играет ключевую роль не только в борьбе с загрязнениями, но и в переработке и повторном использовании отходов. Гетерогенный катализ и биокатализ используются для преобразования пластмасс и других углеродистых отходов в пригодные для использования мономеры, топливо, синтез-газ и адсорбенты в более устойчивых условиях.

Экологический катализ играет центральную роль в разработке более чистого производства и достигает уменьшения негативных воздействий на окружающую среду за счет использования возобновляемого, дешевого и легкодоступного сырья при минимальном производстве нежелательных побочных продуктов или их отсутствии.

Биокатализ обычно действует в мягких условиях реакции, и каскадные ферментативные процессы все чаще применяются для производства промышленных продуктов, фармацевтических препаратов и биотоплива из материалов растительного происхождения. С открытием устойчивых электрокатализаторов, обладающих повышенной активно-

стью и повышенной стабильностью, электрокатализ теперь может эффективно расщеплять воду для производства водорода в качестве экологически чистой энергии, а также снижать содержание CO₂ для производства низкоуглеродного топлива.

Существует множество исследований катализа, которые имеют другие экологические последствия, помимо контроля загрязнения и более чистого производства. Катализ, происходящий в природной среде, вызывает окислительно-восстановительные превращения как органических, так и неорганических веществ и, таким образом, оказывает глубокое влияние на их экологическую судьбу и риски. Исследования, направленные на понимание таких процессов естественного катализа, имеют первостепенное значение для более разумной оценки экологических рисков и могут вдохновить на разработку более эффективных процессов катализа.

Катализ также используется в химических и биологических анализах, имеющих экологическое значение. Например, ферментативный катализ используется как в иммуноферментном анализе, так и в методах полимеразной цепной реакции для обнаружения вируса Covid-19 в различных образцах окружающей среды.

Быстрый прогресс в химии, биохимии и материаловедении позволяет проводить более эффективный и устойчивый катализ и лучше понимать каталитические механизмы. Огромный прогресс передовых методов определения характеристик в сочетании с быстро растущей вычислительной мощностью и алгоритмами предоставляет мощные инструменты для выяснения механизмов, участвующих в катализе. Это, в сочетании с достижениями в области нанотехнологий и управляемого синтеза, позволяет рационально проектировать многокомпонентные катализаторы с наноструктурами, манипулируемыми сверхактивным, селективным, долговечным и экономически эффективным гетерогенным катализом, применимым к инновационным фото-, электро- и термохимическим процессам, особенно полезным для решения грандиозных задач.

Исследования в области биокатализа также быстро продвигаются вперед, чему способствует прогресс в области белковой инженерии, анализа геномных баз данных и вычислительных методов. Достижения в области открытия ферментов, дизайна *de novo* и направленной эволюции расширяют спектр доступных биохимических реакций, катализируемых ферментами, обладающими высокой эффективностью и селективностью. Многоступенчатые каскады ферментов могут быть спроектированы для

достижения ранее недостижимых целей, включая производство химикатов и биотоплива из растительных материалов и более эффективное разложение стойких органических загрязнителей без образования вредных побочных продуктов.

Экологический катализ – это междисциплинарная область исследований, которая быстро развивается. Используя преимущества текущих достижений науки и техники в смежных областях, исследователи из различных областей разрабатывают более эффективный и устойчивый катализ, применимый к контролю загрязнения, более чистому производству и более экологичным процессам. Все это в совокупности будет способствовать целостному подходу к решению грандиозных проблем, с которыми человечество сталкиваемся сегодня, чтобы обеспечить устойчивое будущее для всех.

В данном обзоре представлены несколько примеров, иллюстрирующих возможности и потенциал экологического катализа, масштабы которого все еще развиваются и могут быть определены будущими исследованиями. Важнейшая роль экологического катализа в области устойчивого развития представляет собой особую привилегию и ответственность, возложенную на исследования в этой динамично развивающейся области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Qingguo Huang. Grand challenges present great opportunities in environmental catalysis // *Frontiers in Environmental Engineering*. 06.12.2022. URL: <http://www.frontiersin.org/journals/environmental-engineering/articles/10.3389/fenve.2022.1087494/full> (дата обращения: 19.01.25).
2. Kozlov I. A., Garipov R. M. Catalysis and its impact in the processes of deep processing of plant biomass. *Proceedings of universities. applied chemistry and biotechnology*. 2017;7(1):188-191. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-188-191>
3. Noskov A., Vernikovskaya N., Klimov O., Panchenko V., Timofeeva M., Taran O., Shutilov A. Catalytic oxidative cleaning of gases from toxic nitrogen-containing compounds. *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(1):12-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-1-12-16>.

Н.Е. Беспалько, доц., канд. хим. наук;
А.А. Жернякова, магистрант,
А.В. Ташкинов, ассист. (ФГБОУ ВО ТГТУ, г. Тамбов, Россия)

БИОИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Химическое производство лакокрасочных изделий является одной из отраслей наносящей высокий экологический ущерб окружающей среде. Основные источники загрязнений, образующиеся в процессе производства лакокрасочных материалов, включают выбросы летучих органических соединений (ЛОС), тяжелых металлов, таких как хром и свинец, а также отходы производства на основе органических растворителей, что в свою очередь представляет опасность для здоровья живых существ, способствует разрушению атмосферного озона и генерации фотохимического озона на уровне земли [1]. Внедрение биоиндикаторов в систему экологического мониторинга позволит более детально оценить влияние химического производства лакокрасочных изделий на экологическую систему [2].

Биоиндикаторы предоставляют возможность выявления зон накопления различных загрязнителей в экосистемах, отслеживания динамики изменений в окружающей среде и определения степени вредного воздействия. Совместное применение биоиндикаторов и химических методов анализа, способствует обеспечению более полного и комплексного анализа [3].

Выбор биоиндикаторов для мониторинга воздействия загрязнителей, возникающих в процессе химического производства лакокрасочных изделий, основывается на нескольких ключевых принципах, обеспечивающих их эффективность и чувствительность к определенным химическим веществам:

1. Способность к биокумуляции загрязняющих веществ.

Одним из важных критериев выбора биоиндикаторов является их способность накапливать химические вещества, попадающие в окружающую среду. Летучие органические соединения (ЛОС), тяжелые металлы, фенолы и органические растворители имеют тенденцию накапливаться в организмах, что делает возможным долгосрочный мониторинг загрязнений через оценку концентраций веществ в биоте [3]. Совместное

применение биоиндикаторов и химических методов анализа, способствует обеспечению более полного и комплексного анализа.

2. Чувствительность к изменениям химического состава среды.

Вторым важным критерием биоиндикаторов выступает высокая чувствительность к незначительным изменениям химического состава среды. Ряд биоиндикаторов проявляет характерные изменения в физиологии и структуре сообществ при воздействии токсичных компонентов, таких как органические растворители или тяжелые металлы. Это позволяет выявлять присутствие загрязнителей на ранних стадиях их воздействия, обеспечивая более точное и своевременное реагирование [1].

3. Специализация на целевых загрязняющих веществах.

Для каждой категории загрязняющих веществ могут быть выделены специализированные биоиндикаторы, обладающие высокой чувствительностью к определенным химическим соединениям [4].

4. Воспроизводимость реакций и предсказуемость биологической активности.

Эффективность биоиндикаторов также зависит от воспроизводимости и предсказуемости их реакции на изменение химического состава среды. Биоиндикаторы должны четко и наглядно демонстрировать отклик в ответ на увеличение концентрации загрязняющих веществ. Примером могут служить, изменение морфологии, фотосинтетической активности и роста у водорослей или изменение численности фитопланктона.

5. Экологическая значимость и доступность индикаторов.

При подборе биоиндикаторов важно учитывать их роль в экосистемах и распространенность в исследуемом регионе [2].

Основываясь на ключевых принципах, обеспечивающих эффективность и чувствительность к определенным химическим веществам, были определены и сведены в таблицу основные типы биоиндикаторов, подходящих для мониторинга воздействия химического производства лакокрасочных изделий, в частности для оценки загрязняющих веществ в экосистемах Центральной России.

В таблице наглядно представлены виды биоиндикаторов, которые могут быть применены для мониторинга загрязнений, обусловленных деятельностью химического производства лакокрасочных изделий, а также какие типы воздействия этих загрязнителей могут быть выявлены с использованием различных категорий биоиндикаторов, включая растения, животных и микроорганизмов.

Таблица – Биоиндикаторы для мониторинга воздействия химического производства лакокрасочных изделий (для Центральной части России)

Тип биоиндикатора	Пример	Загрязняющие вещества	Реакция на воздействие	Концентрации загрязняющих веществ, при которых наблюдается эффект
1	2	3	4	5
Растения	Лишайники (<i>Hypogymnia physodes</i> , <i>Xanthoria parietina</i> , <i>Usnea hirta</i>)	Летучие органические соединения (ЛОС), тяжёлые металлы	Изменение окраски, снижение жизнеспособности, сокращение видового разнообразия, подавление роста, деструкция тканей	ЛОС: 0,1-0,5 мг/м ³ , тяжёлые металлы: 0,1-0,3 мг/м ² для Hg, Pb
	Мхи (<i>Sphagnum</i> , <i>Bryum argenteum</i> , <i>Polytrichum commune</i>)	Тяжёлые металлы, ЛОС	Накопление загрязнителей в тканях, угнетение роста, ослабление фотосинтетической активности, нарушение водного баланса	Тяжелые металлы: 0,2-1 мг/л для Cd, Pb, Cr; ЛОС: 0,1-0,4 мг/м ³
	Водоросли (<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Scenedesmus quadricauda</i>)	Органические растворители, фенолы	Снижение численности, нарушение фотосинтеза, изменение состава пигментов, потеря биомассы	Органические растворители: 10-50 мг/л; фенолы: 0,05-0,1 мг/л
Животные	Рыбы (каarp)	Фенолы, тяжёлые металлы	Накопление токсичных веществ, изменение физиологии (нарушения обмена веществ), морфологические изменения жабр, повышение смертности	Фенолы: 0,05-0,2 мг/л; тяжёлые металлы: 0,02-0,1 мг/л для Hg, Pb
	Моллюски (пресноводные мидии)	Органические растворители, тяжёлые металлы	Накопление токсинов в тканях, снижение активности ферментов, уменьшение темпов роста, деформация раковин	Органические растворители: 5-15 мг/л; тяжёлые металлы: 0,01-0,05 мг/л для Cd, Pb
	Земноводные (лягушки, тритоны)	Органические вещества, тяжёлые металлы	Снижение численности, изменение состояния кожи и поведения	Тяжелые металлы: 0,05-0,1 мг/л для Hg, Pb, Cd

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
Микро- организмы	Бактерии (<i>Pseudomonas putida</i>)	Органические растворители, фенолы	Изменение чис- ленности и мета- болической ак- тивности	Органические растворители: 50-500 мг/л; фенолы: 0,1- 1,0 мг/л
	Грибы (<i>Asper- gillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>)	Тяжёлые металлы	Нарушение ро- ста, изменение состава грибной микрофлоры	Тяжелые ме- таллы: 0,5-1 мг/л для Pb, Cd, Zn
	Фитопланктон (диатомовые водоросли)	Органические растворители, токсичные вещества в воде	Снижение чис- ленности, изме- нения в видовой структуре	Органические растворители: 5-20 мг/л; токсичные вещества: 0,5-2 мг/л для Hg, Pb

Примечание.

- Растения, такие как *Hypogymnia physodes*, *Xanthoria parietina*, *Usnea hirta*, *Sphagnum*, *Bryum argenteum* и *Polytrichum commune*, широко распространены в Центральной России и могут служить эффективными биоиндикаторами в условиях воздействия химического загрязнения.
- Указанные концентрации загрязняющих веществ являются ориентировочными и могут варьироваться в зависимости от других факторов окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А. В. Экологическое развитие в лакокрасочной промышленности // Химия и технологии окружающей среды. 2021. Т. 12, № 4. С. 30-38.
2. Кузнецова Е. А., Волков В. И. Биоиндикация как метод исследования экосистем // Журнал экологических исследований. 2019. Т. 8, № 2. С. 15-21.
3. Иванов И. И., Петров П. П. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Экология и мониторинг окружающей среды. 2020. № 3. С. 45-52.
4. Федорова Т. В., Анисимов О. П. Биоиндикаторы загрязнения окружающей среды // Экологический мониторинг. 2021. № 6. С. 90-98.

Н.Е. Беспалько, доц., канд. хим. наук;
А.А. Жернякова, магистрант;
А.В. Ташкинов, ассист.
(ФГБОУ ВО ТГТУ, г. Тамбов, Россия)

АНАЛИЗ ИНДЕКСОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ, КАК МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕЙ ПОТЕРИ ПРОДУКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ И БИОРАЗНООБРАЗИЯ ВСЛЕДСТВИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Проблема, связанная с лесными пожарами, остаётся наиболее острой для экологии. Будь то природные или антропогенные пожары, все они вызывают нарушение растительного покрова, приводят к эрозии почв, уменьшают площадь водосбора, приводят к изменению состава и отражательной способности атмосферы. Это в свою очередь ведёт к климатическим изменениям и нарушению геохимического цикла углерода.

В связи с этим, одним из основополагающих методов мониторинга лесных пожаров, стало дистанционное зондирование.

Одними из основных параметров для оценки состояния растительного покрова, которые будут рассмотрены в данной работе, являются:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный вегетационный индекс [1];
- EVI (Enhanced Vegetation Index) – «оптимизированный» вегетационный индекс [2];
- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) – вегетационный индекс с поправкой на почву [3];
- NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – нормализованный разностный индекс влажности [4].

Для обзора состояния растительности на территории Тамбовской области, нами были выбраны данные Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2, обработанные по стандартам Collection 2, с предварительным уровнем обработки данных Level-2, в которых внесена атмосферная коррекция [5].

Для анализа нам потребуются данные спектральных полос, используемый в данной работе перечень приведен в таблице.

Таблица –Перечень спектральных полос, используемый для расчетов [6]

Наименование	Длины волн, мкм	Назначение
Band 2	0,450-0,515	Измерение в синей области спектра
Band 4	0,630-0,680	Измерение в красной области спектра
Band 5	0,845-0,885	Измеряет ближний инфракрасный диапазон (NIR)
Band 6	1,560-1,660	Измеряет коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR)

Дальнейшие расчеты и визуализация были проведены в программе QGIS Desktop 2.18.28 [7].

Территория, которая была использована для демонстрации применения анализа индексов растительности приведена на рис. 1.

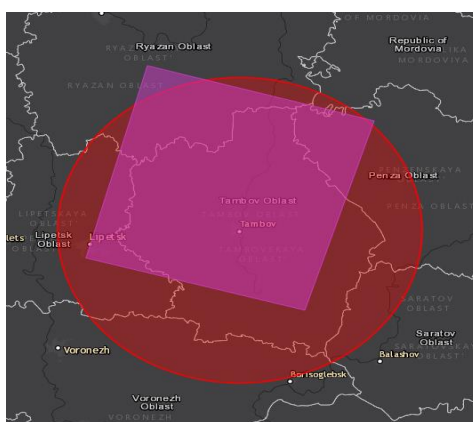


Рисунок 1 – Территория, используемая для анализа [5]

На рис. 1 красной окружностью выделена ориентировочная территория Тамбовской области, розовым цветом в свою очередь территория, которую способен охватить спутник за однократную съёмку, для демонстрационных целей данной площади будет достаточно.

Перечень снимком в разных спектральных диапазонах, необходимый нам для дальнейших расчётов, представлен на рис. 2.

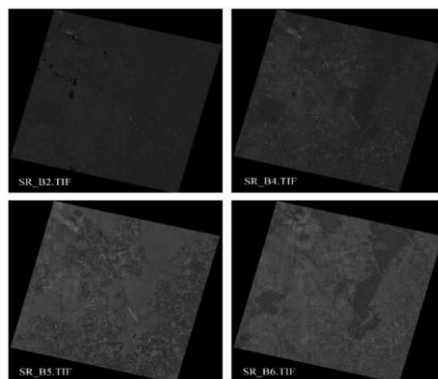


Рисунок 2 – Перечень используемых спектров [5]

Первым рассмотренным нами параметром является NDVI, применяемый для количественной оценки зеленой растительности, плотности и здоровья. Расчет NDVI проводится по формуле 1 [1].

$$NDVI = \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + Band\ 4} \quad (1)$$

Преобразуя формулу 1 под расчеты, проводимые в программе QGIS, получим вид, показанный в формуле 2.

$$NDVI = \frac{"SR\_B5@1" - "SR\_B4@1"}{"SR\_B5@1" + "SR\_B4@1"} \quad (2)$$

По окончании расчета получаем растровое изображение, представленное на рис. 3 (слева), для большей наглядности полученному изображению был добавлен цвет (справа).

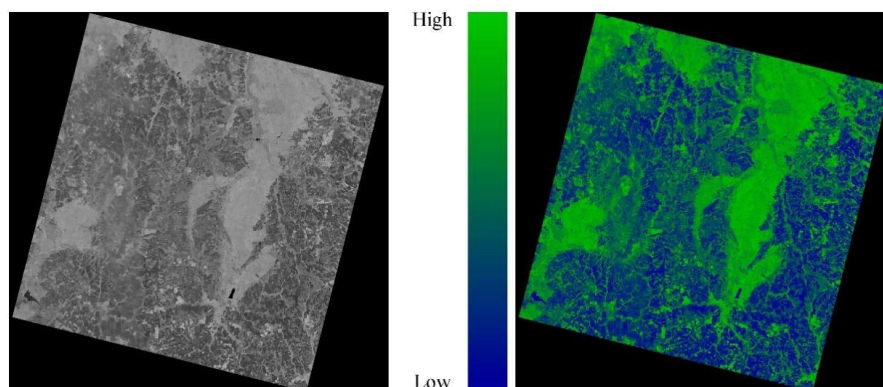


Рисунок 3 – Расчетные параметры NDVI

Анализируя рис. 3, мы можем наглядно увидеть схему распределение зеленой растительности и её плотность на территории Тамбовской области, выбранной для анализа.

Вторым параметром, является EVI, по своему назначению он схож с показателем NDVI и также может использоваться для количественной оценки зелёной растительности.

Главное отличие EVI заключается в том, что он включает в себя значение показателя L для корректировки фонового шума растительного покрова, C в качестве коэффициента атмосферной сопротивляемости, а также значение B синей спектральной полосы [2].

Расчет показателя EVI проходит по формуле 3 [2].

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + 6 \cdot Band\ 4 - 7.5 \cdot Band\ 2 + 1} \quad (3)$$

Вид формулы, преобразованный для расчета в QGIS показан в формуле 4.

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{"SR\_B5@1" - "SR\_B4@1"}{"SR\_B5@1" + 6 \cdot "SR\_B4@1" - 7.5 \cdot "SR\_B2@1" + 1} \quad (4)$$

Результаты расчетов показателя EVI приведены на рис. 4.

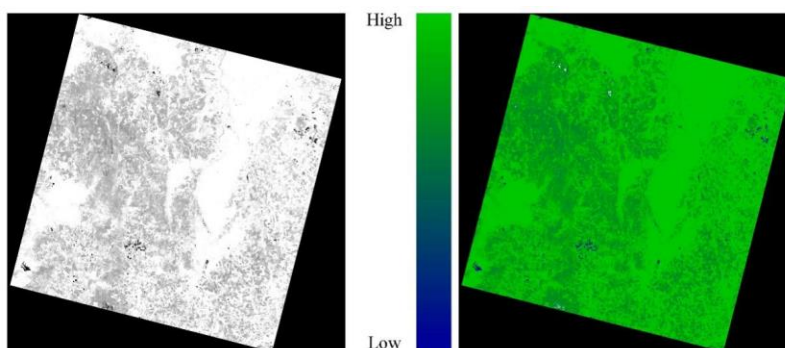


Рисунок 4 – Расчетные параметры EVI.

Следующим показателем, который может использоваться для оценки растительности, является SAVI.

SAVI используется для корректировки NDVI с учётом влияния яркости почвы в районах с низким растительным покровом и рассчитывается по формуле 5 [3].

$$SAVI = \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + Band\ 4 + 0.5} \cdot 1.5 \quad (5)$$

Вид формулы для QGIS показан в формуле 6.

$$SAVI = \frac{"SR\_B5@1" - "SR\_B4@1"}{"SR\_B5@1" + "SR\_B4@1" + 0.5} \cdot 1.5 \quad (6)$$

Результаты расчётов показателя SAVI и его визуализация представлены на рис. 5.

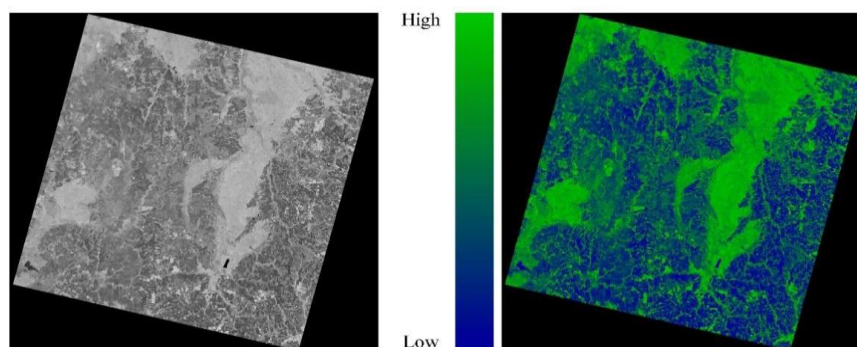


Рисунок 5 – Расчётные параметры SAVI.

Последним рассматриваемым в нашей работе параметром является NDMI.

NDMI используется для определения содержания воды в растительных покровах и рассчитываемый по формуле 7 [4].

$$NDMI = \frac{Band\ 5 - Band\ 6}{Band\ 5 + Band\ 6} \quad (7)$$

Вид формулы для программы QGIS показан в формуле 8.

$$NDMI = \frac{"SR\_B5@1" - "SR\_B6@1"}{"SR\_B5@1" + "SR\_B6@1"} \quad (8)$$

Визуализация параметра NDMI показана на рис. 6.

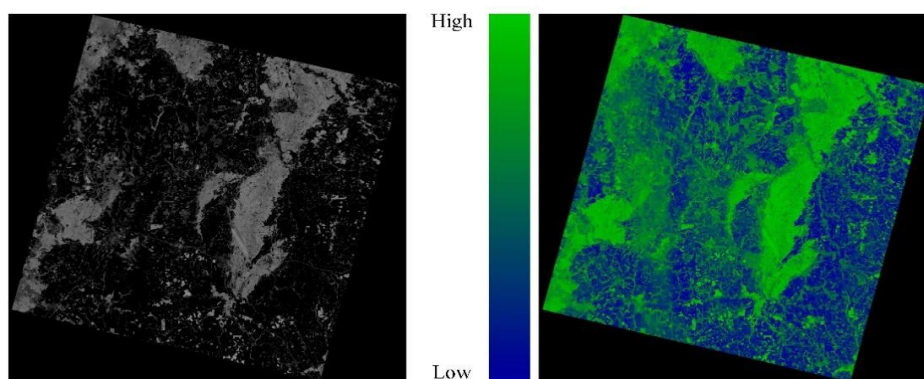


Рисунок 6 – Расчетные параметры NDMI.

Подводя итог, мы наглядно убедились в практическом применении индексов растительности, как инструмента для анализа состояния растительного покрова части территории Тамбовской области.

Исследованные нами параметры позволяют не только выявлять изменения в растительном покрове, но также спрогнозировать проблемы связанные с деградацией растительности, климатическими изменениями и антропогенной деятельностью человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. United States Geological Survey. Landsat Normalized Difference Vegetation Index [Электронный ресурс]: URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con, свободный. (дата обращения: 09.01.2025).

2. Landsat Enhanced Vegetation Index [Электронный ресурс]: URL: <https://www.usgs.gov/landsatmissions/landsat-enhanced-vegetation-index?qt->

science_sport_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
(дата обращения: 09.01.2025)

3. U.S. Geological Survey. Landsat Soil Adjusted Vegetation Index [Электронный ресурс]: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index> (дата обращения: 09.01.2025).

4. U.S. Geological Survey. Normalized difference moisture index [Электронный ресурс]: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index> (дата обращения: 09.01.2025).

5. Landsat 8-9 OLI/TIRS: Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. Remote Sensing of Environment, 185, 46-56.

6. NASA. Landsat 8 Bands [Электронный ресурс]: URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-bands/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 09.01.2025).

7. QGIS. Installation Guide [Электронный ресурс]: URL: <https://qgis.org/resources/installation-guide/> (дата обращения: 12.01.2025).

УДК 666.3-128

Ю.А. Климош, декан факультета ХТиТ, канд. техн. наук;
А.И. Татур, студ.; А.С. Бубич, студ.; А.А Герасимчук, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВ, САПОНИТСОДЕРЖАЩИХ ТУФОВ И ГЛАУКОНИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В результате проведенных геологоразведочных работ в 2023 г. выполнена детальная разведка Новодворского месторождения базальтов и туфов, выявленного в Пинском районе Брестской области. В результате разведки месторождения уточнены глубины залегания и мощности пластов и выделенных слоев базальтовых и туфовых пород, обозначены границы распространения пород технологических типов сырья Т1, Т2, Т3. Подтверждены качественные и количественные характеристики и технологические свойства пород, слагающих указанные технологические типы.

Установлено, что Новодворское месторождение базальтов и туфов отличается специфическим залеганием пород, которые располагаются по высоте толщи сверху вниз в следующем порядке: вскрыша в виде строительных песков с примесью гравия; глауконитсодержащие пески, алевроиты и алевролиты; базальты и сапонитовые туфы [1].

Известно, что комплексное использование минерального сырья месторождения «Новодворское» может быть реализовано только в случае разработки месторождения открытым способом. При разработке карьера планируется, что пески, алевроиты, туфы и туффиты будут селективно складироваться на специально отведенных для этих целей площадях. Таким образом, актуальным является поиск направлений использования не только базальтовых пород, но и попутных полезных ископаемых – туфов и туффитов, глауконитсодержащих пород.

Наиболее широко базальтовые породы применяются в производстве волокнистых материалов [2]. В настоящее время промышленность производит и применяет базальтовые непрерывные волокна, штапельные короткие волокна и супертонкие волокна. Назначение базальтовых волокон: непрерывных волокон – производство армирующих и композитных материалов и изделий, тканей и нетканых материалов; штапельных коротких волокон – производство теплоизоляционных материалов матов и плит; супертонких волокон – производство тепло- и звукоизоляционных материалов высокого качества (холстов, матов, плит).

Волокна из базальтовых пород обладают высокой природной исходной прочностью, стойкостью к воздействию агрессивных сред, долговечностью, электроизоляционными свойствами, производятся из природного, экологически чистого сырья. Поэтому базальтовые волокна имеют большую перспективу применения в промышленности, строительстве, энергетике, транспорте и даже в сельском хозяйстве [2].

Ежегодно в мире отмечается рост рынка выпуска и применения базальтового волокна, что делает перспективным проекты по развитию добычи и переработки базальтового сырья с целью не только реализации на внутреннем рынке, но и для последующего экспорта продукции в страны СНГ и Евросоюза.

Самыми крупными потребителями базальтов в РБ являются производители минеральной ваты и тканей из базальтового волокна. Белорусские производители волокнистых материалов ежегодно до 2022 г. импортировали из Украины базальтовый щебень, из которого затем получали базальтовые волокна. Базальтовое волокно используют для производства минеральной ваты (утеплителя для фасадов зданий) и базальто-

вых тканей. С 2022 г. связи с невозможностью импорта базальтов из Украины предприятиям Республики Беларусь пришлось переориентировать рынок закупки базальтового щебня. В настоящее время белорусскими предприятиями используется габбро-диабаз, импортируемый из Карелии (Российская Федерация). Значительное увеличение расстояния от карьера до потребителя сырья привело к возрастанию средней цены ориентировочно в 2 раза за счет увеличения транспортных расходов.

Вторым перспективным направлением использования базальтов, сапонитсодержащих туфов и глауконитов в РБ, на наш взгляд, является промышленность строительных материалов. Проблемой вовлечения в производство отдельных проб отечественных базальтов и глауконитов занимались разные белорусские исследователи. Значительный объем работ выполнен сотрудниками кафедры технологии стекла и керамики БГТУ в тесном сотрудничестве со специалистами НПП по геологии.

Крупнотоннажным потребителем базальтов могут стать производства керамических плиток. Авторами работы [3] была проведена оценка возможности использования базальтов и туфов в качестве компонентов в шихтовых составах для получения керамических плиток. Базальт и туф вводились частично взамен полевого шпата в определенных соотношениях. Так, базальт вводился в количестве 2,5–15 мас. %, а сапонитовый туф 5–20 мас. %. Однако, с учетом того, что содержание оксидов железа в полученном материале влияет на интенсивность окраски образцов, оптимальное количество базальта составляет 7,5–8,25 мас. %. При введении туфа в составы керамических масс взамен эквивалентного количества полевого шпата оптимальным содержанием туфа является 5,0–7,5 мас. %, так как при увеличении содержания до 10 мас. % наблюдался некоторый рост водопоглощения образцов плиток.

В современных условиях для плиточных предприятий РБ крайне актуальна замена традиционных флюсующих материалов (полевых шпатов, пегматитов) на местные сырьевые аналоги, например, такие как базальт и туф. В последние годы произошли значительные изменения в технологическом процессе изготовления керамических плиток, в частности изменилась сырьевая база, режимы термообработки плиток. В этой связи, проводимые в настоящее время БГТУ исследования по использованию белорусских базальтов и сапонитсодержащих туфов в плиточных массах, являются крайне актуальными и своевременными.

В литературе встречается достаточное количество работ по использованию базальтов для получения стеклокристаллических материалов – ситаллов и каменного литья [4-5].

Значительно меньше сведений встречается в литературе по изучению возможности использования туфов различных месторождений в производстве материалов различного назначения.

Из литературы известно, что сапонитсодержащие базальтовые туфы являются, учитывая их минералогический и химический состав, перспективным силикатным сырьем в строительной отрасли – производство портландцемента, керамических изделий, стекла и стеклокристаллических материалов, приготовление буровых промывочных жидкостей [6].

Широкое применение этой горной породы в строительстве обусловлено легкостью ее обработки и прочностью. Вулканические и известковые туфы применяются при облицовочных работах. Специально подготовленные измельченные туфы используются в качестве заполнителей в легких бетонах. Такие заполнители производятся из отходов дробления пород и производства облицовочных плит из них. Туфовые добавки способствуют стойкости строительных конструкций к воздействию морской воды, в суровых климатических условиях, в горах. Строительные туфы обеспечивают хорошую тепло- и звукоизоляцию зданий. Они также характеризуются высокой водостойкостью и морозостойкостью.

Учеными работы [6] исследованы базальтовые туфы Ровенской области. Испытания показали, что базальтовые туфы могут быть использованы как основное сырье при производстве керамического кирпича, черепицы, плиток для фасадов, изготавливаемых пластическим и полусухим формованием. Образцы изделий характеризуются насыщенной терракотовой окраской, а их свойства соответствуют требованиям стандарта.

В исследовании [7] подтверждено, что белорусские сапонитсодержащие базальтовые туфы из различных скважин юго-запада Республики Беларусь могут использоваться в сельском хозяйстве в качестве магнийсодержащего мелиоранта широкого спектра действия.

Авторами исследования [8] изучалось поведение при нагревании цеолитовых туфов (Турция). Результаты исследований позволили авторам сделать вывод о перспективности использования этих пород при производстве строительного камня, цементных блоков, керамических плиток и керамического гранита.

В исследованиях [9-10] изучены базальтовые туфы юга Турции на предмет их применения для производства керамических и стеклокристаллических материалов. Отмечено, что при температуре обжига 1150 °С из сырьевой композиции, включающей 50 % глины и 50 % туфа, по-

лучены образцы материалов с водопоглощением 4 % и общей пористостью 13 %. При плавлении туфа при 1350 °С и последующей кристаллизацией в интервале температур 1020–1080 °С получены стеклокристаллические материалы с высоким комплексом эксплуатационных характеристик.

Авторами исследования [11] предложены составы керамических масс и технология производства керамического гранита, позволяющая заменить привозной полевой шпат на цеолитовый туф. Полученный керамогранит характеризовался следующими характеристиками: механическая прочность при изгибе – 50,2 МПа, водопоглощение – 0,04 %, общая усадка – 10 %.

Авторы работы [12] предложили использовать природные туфы в качестве носителей хромофорных агентов, таких как оксиды и гидроксиды железа. Подтверждена возможность применения искусственных цеолитовых туфов, полученных спеканием природных цеолитовых туфов, для изготовления окрашенных керамических материалов однородной цветовой гаммы с высокими техническими характеристиками.

Среди областей применения глауконита в литературе [13–15] упоминаются следующие направления – сельское хозяйство, (животноводство, птицеводство, рыбоводство, производство органо-минеральных удобрений); энергетика (очистка и регенерация энергетических масел; подготовка воды для котлов и бойлеров); строительство и производство строительных материалов (перегородки, огнеупорные перегородки, вяжущие смеси, безусадочные тампонажные растворы, магнезитовая плитка, ксилолит, литьевые изделия); производство пигментов; водоснабжение (очистка питьевой и оборотной воды); экологические мероприятия (оздоровление и восстановление почв; очистка сточных вод; улавливание газов; устранение запахов; нейтрализация разливов нефтепродуктов; сорбция тяжелых металлов, радионуклидов и токсикантов); нефтехимия (обессоливание и обезвоживание нефти; катализаторы); пищевая промышленность (пищевые добавки, консервирование); медицина и косметология.

Таким образом, в случае разработки карьера базальтов и туфов «Новодворское» основным их потребителем будут белорусские предприятия, выпускающие базальтовое волокно и изделия из него (ОАО «Гомельстройматериалы», ООО «БелМинералГрупп», ОАО «Полоцк-Стекловолокно», ЧП «Базальтум» и др.). При реализации процесса подготовки базальтового щебня, включающего несколько стадий измельчения и грохочения, непременно будут образовываться базальтовые

отсевы (некондиционная фракция), которые являются фактически готовым сырьем для производства строительных материалов, таких как керамические плитки, керамический кирпич, пористые заполнители для легких бетонов, стекла типа марблит и др. Извлекаемые туфы и глауконитсодержащие породы могут быть использованы для нужд сельского хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменкова, О.Ф., Носова А.А., Веретенникова Н.В. Минералогия и петрогенезис вендских базальтов и долеритов Беларуси//Литосфера. 2008. № 1 (28). С. 76-96.
2. Аксаментова Н.В., Кожемякина Н.А., Баранцева С.Е., Лактюшин А.Н., Хведчин И.В., Мищенко Е.С. Перспективы использования горных пород основного состава юга Беларуси для производства минеральных волокон//Литосфера. 1998. № 8. С. 97-107.
3. Кузьменкова О.Ф., Левицкий И.А., Баранцева С.Е., Позняк А.И. Вендские траппы Беларуси – перспективное сырье для силикатной промышленности//Литосфера. 2012. № 2 (37). С. 130-137.
4. Каменное литье : пат. СССР № 598850, заявл. 01.09.1978; опубл. 25.03.1978. Бю. №11. 2 с.
5. Стеклокристаллический материал : пат. Рос. Федерация. № 2093484, заявл. 11.01.1995; опубл. 20.10.1997. Бю. № 23. 4 с.
6. Стекло для стеклокристаллического материала : пат. Рос. Федерация. №2062757, заявл. 01.10.1993; опубл. 27.06.1996. Бю. № 33. 5 с.
7. Дворкин Л.И. и др. Базальтотуфовая керамика // Стекло и керамика. 2000. № 11. С. 22-23.
8. Босак В.Н., Стрельцова Г.Д., Кузьменкова О.Ф., Сачивко Т.В. Влияние сапонитсодержащих базальтовых туфов на продуктивность сельскохозяйственных культур // Земледелие и защита растений. 2016. №5. С. 6-9.
9. Çağlar Duvarcı Ö. etc. Thermal behavior of a zeolitic tuff // Ceramics International. 2007. Vol. 33(5). P. 795-801.
10. Sibel Ergul etc. Characterization of basaltic tuffs and their applications for the production of ceramic and glass–ceramic materials // Ceramics International. 2009. Vol. 35. P. 2789-2795.
11. Karamanov, Alexander. Sintered material from alkaline basaltic tuffs // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. P. 595-601.
12. Верченко, А. В. Ресурсо- и энергосберегающая технология производства керамического гранита с использованием нетрадиционного алюмосиликатного сырья и минеральных отходов // материалы II Все-

российской молодежной научной конференции с международным участием «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Удэ, 15–17 мая 2014 г.) : Изд-во Бурятского госуниверситета, 2014. – 300 с.

13. Liguori, B. Chromophore-bearing zeolite materials as precursors of colored ceramics // *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2005. Vol. 155. P. 367-374.

14. Павлюкевич Ю.Г., Левицкий И.А., Баранцева С.Е. [и др.] Глауконитовое сырье – основа получения функциональных материалов строительного назначения // *Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов: Материалы всероссийской науч.-техн. конференции/Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. С. 199-202.*

15. Левицкий И.А., Павлюкевич Ю.Г., Дятлова Е.М. и др. Об использовании глауконитового сырья в производстве изделий строительного назначения // *Геология, поиски и освоение месторождений полезных ископаемых // Сборник научн.тр. Мн.: БЕЛГЕО, 2010. Вып. 3. С. 195-201.*

16. Мурашко Л.И., Карабанов А.К., Кольяненко В.П. и др. Новые данные о перспективах использования глауконита в народном хозяйстве Беларуси // *Минерально-сырьевая база Республики Беларусь: состояние и перспективы. Мн.: БелНИГРИ, 1997. С. 118-119.*

УДК 666.3-128

Ю.А. Климош, декан факультета ХТиТ, канд. техн. наук;
А.Н. Шиманская, ст. преп., канд. техн. наук;
А.С. Бубич, студ.; А.А Герасимчук, студ.
(БГТУ, г. Минск).

СТЕКЛА, СТЕКЛОВИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И КЕРАМИЧЕСКИЕ ОБЛИЦОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗАЛЬТОВ И ТУФОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОВОДВОРСКОЕ

Для получения керамических материалов, стекол, стекловидных покрытий и стеклокристаллических материалов достаточно широкое применение находят самые разнообразные магматические и осадочные горные породы, большинство из которых импортируется из-за рубежа. При необходимой подшихтовке местными традиционными природными компонентами (кварцевым песком, доломитом, мелом и др.) они являют-

ся основой керамических и стекольных шихт.

Проблемой вовлечения в производство белорусского глинистого сырья (каолинов, бентонитов, тугоплавких глин), гранитоидных отсеков, базальтов, глауконитов и других пород занимались и продолжают заниматься белорусские ученые в кооперации с представителями промышленных предприятий. Значительный объем работ выполнен сотрудниками кафедры технологии стекла и керамики БГТУ в тесном сотрудничестве со специалистами НПП по геологии [1-5]. Переориентация поставок с украинского рынка традиционного силикатного сырья (каолины, огнеупорные глины, базальты и др.) на российский рынок внесло значительные коррективы в рецептуры стекольных и керамических шихт, сказалось на качестве и себестоимости продукции (увеличение количества брака, увеличение транспортных расходов, рост стоимости импортируемого сырья). Фактически, начиная с 2022 г. плиточные производства, стекольные предприятия, производители базальтового волокна и каменной ваты вынуждены постоянно экспериментировать с рецептурами и технологическими параметрами, искать новые месторождения импортируемого сырья, оптимальные сочетания компонентов. В этой связи, обнаружение на территории Республики Беларусь и детальная разведка собственных запасов базальта и сапонитсодержащих туфов открывает новые возможности рационального использования недр и создания новых товарных продуктов на основе этого сырья. Так, перспективным, на наш взгляд, является использование базальтов в качестве компонента сырьевых композиций при производстве облицовочных материалов (плитки керамической и клинкерного кирпича), пористых заполнителей для легких бетонов, декоративных стекол и покрытий. В плиточных и кирпичных массах базальт может полностью стать альтернативой гранитам (гранитоидным отсевам) и полевым шпатам. По сравнению с гранитами базальты отличаются особыми свойствами, в частности, при высоких показателях прочности базальт легче обрабатывается. Особенно ценным является практически полная аналогия химического и минерального составов, а также физико-химических свойств отечественных белорусских базальтов и базальтов Украины, на которых ранее работали белорусские производители волокна и которые в настоящее время в РБ не импортируются.

Сапонитсодержащие туфы как индивидуально, так и в различных сочетаниях с базальтом могут найти применение в производстве пористых заполнителей для легких бетонов и керамического кирпича без потери в качестве.

На основе ранее выполненных работ и аналитического обзора литературы определены следующие основные направления исследований: оценка технологических характеристик, их химико-минерального состава, изменения агрегатного состояния и физико-химических процессов при нагревании как отдельных пород Новодворского месторождения, так и сочетаний базальтов, туфов и глауконитсодержащих вскрышных пород; разработка рецептур сырьевых композиций для получения керамических материалов (керамического клинкерного кирпича, плиток для внутренней облицовки стен и настила полов), стекол и стекловидных покрытий с введением в их состав пород Новодворского месторождения; разработка технологических рекомендаций и подбор температурно-временных параметров получения керамических материалов строительного назначения.

Многопозиционной термической обработкой горных пород в интервале температур 20-1450 °С в сочетании с результатами дифференциальной сканирующей калориметрии установлены наиболее характерные температурные интервалы физико-химических процессов, протекающих при нагревании базальтов, глауконитсодержащих пород, сапонитсодержащих туфов: 305-410 °С – переход структурного железа (II) в (III) с образованием гематита; 550-590 °С – полиморфное превращение кварца из α - в β -форму; 600-1000 °С – дегидратация глинистых минералов, диссоциация карбонатов кальция и магния; 1250-1400 °С – образование расплава с переходом оксида железа (II) в стекловидную фазу.

В результате экспериментальных исследований установлено, что базальты и сапонитсодержащие туфы могут быть использованы в качестве активной сырьевой добавки для получения клинкерного керамического кирпича благодаря высокому содержанию Fe_2O_3 и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. В качестве сырьевых материалов использованы тугоплавкая глина месторождения «Журавлево» (Брестская область), российские огнеупорные глины Новоорского и Кумакского месторождений, базальты, сапонитсодержащие туфы и глауконитсодержащие породы. Полученные экспериментальные образцы кирпича могут быть отнесены к клинкерному кирпичу класса А (температура обжига образцов 1200 °С) и класса Б (температура обжига 1150 °С), рекомендуемое содержание базальтов и сапонитсодержащих туфов в массах составляет 15-25 %, глауконитсодержащих пород – 10 %.

С использованием базальтов и сапонитсодержащих туфов разработаны рецептуры и получены опытные образцы плиток для настила полов и плиток для внутренней отделки стен. Указанные компоненты вводи-

лись индивидуально и комплексно в количестве от 5 до 25 % в качестве плавня. За основу взяты рецептуры керамических масс и сырьевые материалы, применяемые на ОАО «Березастройматериалы». Обожженные при 1195 °С образцы керамических плиток для полов характеризовались водопоглощением менее 6 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к плитке керамической группы ВПа. Установлено, что для получения плиток для полов указанной группы возможна практически полная замена в составах керамических масс российского полевого шпата на базальт, но при этом суммарное содержание плавней в составах должно быть не менее 25-30 %.

Образцы плиток для внутренней отделки стен, полученные полностью из белорусского минерального сырья и пород Новодворского месторождения, по водопоглощению отнесены к плиткам группы ВПШ.

Синтезированы опытные туфсодержащие стекла черного цвета типа марблит ТМ5 в системе «Туф – песок кварцевый – сода кальцинированная – мел» и ТФ в системе «Туф – сода кальцинированная – мел», а также стеклокристаллический материал (ТС) получение которого возможно как по ситалловой, так и камнелитейной технологии в системе «Туф – песок кварцевый – доломит – сода кальцинированная – глинозем – мел – оксид железа – оксид хрома».

С использованием базальтов, сапонитсодержащих туфов, глауконитсодержащих пород синтезированы составы полуфриттованных (содержание фритты 18-33 %) и фриттованных (содержание фритты до 93 %) глазурей для декорирования керамогранита и плиток для полов. Получены образцы стекловидных покрытий матовой, полуматовой и блестящей фактуры широкой цветовой гаммы (бежевой, песочно-желтой, горчиной, коричневой и др.). Разработанные составы глазурей прошли испытания на поточно-конвейерной линии ОАО «Березастройматериалы».

Экспериментально подтверждено, что при открытой разработке карьера и селективной выработке пород частичное смешение базальтов с промежуточным слоем туфов не окажет отрицательного влияния на свойства таких строительных материалов, как керамический кирпич, плитка для внутренней отделки стен, стекла типа марблит, поскольку их химико-минералогический состав и влияние на свойства материалов практически идентичны.

Таким образом, при промышленной разработке Новодворского месторождения базальтов и туфов для получения строительных материалов могут быть использованы как полезные (базальты и туфы), так и попут-

ные ископаемые (глауконитсодержащие породы), что обеспечит рациональность и эффективность их добычи и внесет вклад в расширение минерально-сырьевой базы Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранцева С.Е. и др. Научные и технологические аспекты рационального использования магматических и осадочных пород для получения силикатных материалов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 139-144.

2. Баранцева С.Е. [и др.] Использование глауконитсодержащих вскрышных осадочных пород для получения стеклокерамических материалов // Труды БГТУ. Серия 2. 2023. № 1. С. 122-130.

3. Barantseva S.E., Klimosh Y.A., Pospelov A.V., Azaranka I.M., Kurylovich M.A. Glauconite-Containing Overburden is a Promising Raw Material for The Synthesis of Glasses for Various Purposes // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 2023. Vol. 59, № 2. P. 169-176.

4. Баранцева С.Е., Климош Ю.А., Бирюк В.А. Перспективное использование магматических и осадочных пород Республики Беларусь – критерий экономической, экологической безопасности и ресурсосбережения // Промышленная безопасность. 2023. № 10.

5. Баранцева С.Е. и др. Использование осадочных и магматических пород брестской области в производстве клинкерного керамического кирпича // VII Международный научно-технический форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке «Нефтегазохимия – 2024», Минск, 13-15 ноября 2024 г. С. 151-154.

УДК 614.835

А.М. Зайнуллин, доц., канд. техн. наук;
Й.А. Гилагова (КНИТУ, г. Казань, Россия)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА И СМЯГЧЕНИЮ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

С ростом промышленного производства неизбежен рост аварийных ситуаций на предприятиях различных отраслей промышленности (химическая, нефтяная, машиностроительная, пищевая, транспортная и др.) [1-9]. В последние годы отмечен рост аварийности на автотранспортных

предприятиях в различных регионах России. Основной проблемой обеспечения безопасности объектов является недостаточные темпы обновления оборудования, использование средств с истекшим сроком эксплуатации и морального старения, неподготовленность трудящегося персонала или их ошибок, нарушения требований техники безопасности.

Следует отметить, что на автотранспортных предприятиях остается высоким риск возникновения чрезвычайных ситуаций различного характера, которые приводят к серьезным последствиям: разрушению промышленных объектов, зданий жилой застройки, поражению людей, воздействию на производственный персонал и население продуктов горения, нанесению значительного ущерба в том числе окружающей природной среде. В связи с ростом объемов получения горюче-смазочных материалов на предприятии, значительно возрастает острота проблемы безопасности при хранении, транспортировке нефтепродуктов.

На крупных автотранспортных предприятиях необходимо заблаговременно проводить мероприятия по предупреждению возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС), поддерживать в постоянной готовности силы и средства для их ликвидации, чтобы обеспечить безопасность населения и территории, максимально снизить возможный материальный ущерб и потери среди персонала и населения в случае возникновения ЧС. Все вышеперечисленное свидетельствует об актуальности и большой значимости данной исследовательской работы.

Среди основных проблем обеспечения требуемого уровня безопасности на опасных объектах можно выделить следующие:

- 1) крайне низкий уровень защищенности объектов от аварий с тяжелыми последствиями;
- 2) недостаточное внимание руководителей к вопросам интеграции управления безопасности в общую систему управления компаний;
- 3) систематические нарушения компаниями требований пожарной безопасности.

Основными задачами обеспечения безопасности на автотранспортных предприятиях являются:

- рассмотрение основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с разгерметизацией технологического оборудования и объектов хранения нефтепродуктов;
- изучение возможных сценариев развития аварий, в которых возможен разлив нефтепродуктов, изучение нормативно-правовой базы;
- описание возможных факторов, способных повлечь возникновение аварий;

- предложение логичных методических рекомендаций по снижению риска и смягчению последствий ЧС на автотранспортном предприятии;

- разработка необходимых программных мероприятий, способных снизить риск, смягчить последствия возникновения потенциально возможных чрезвычайных ситуаций, обеспечить пожарную безопасность.

Оценка риска объектов предприятий заключается в исследовании опасностей технологических установок при возникновении аварийных ситуаций и определении возможных последствий с целью разработки необходимых мер по управлению безопасностью. Такое управление включает в себя выработку плана действий при аварийных ситуациях, организационно-технические мероприятия по уменьшению вероятностей аварий и последствий от них.

Для количественной оценки риска требуются данные о надежности функционирования различных узлов, арматурных и регулирующих устройств, контрольно-измерительной аппаратуры и других элементов оборудования. Кроме того, необходим сбор и анализ информации, характеризующей последствия аварий, в частности, образование парогазовоздушных облаков, передвигающихся за пределы территории предприятия, что может привести к огромному ущербу.

Многие годы безопасность промышленных объектов обеспечивалась применением инженерных решений с обратной связью. Функционирование действующих объектов поддерживалось введением оправдавших себя практических мероприятий, а также специальной подготовкой по технике безопасности под надзором соответствующих компетентных организаций. Это соответствовало концепции абсолютной безопасности, то есть обеспечению нулевого риска. Однако опыт эксплуатации промышленных объектов показал, что существующий подход не только не обеспечивает их полную безопасность и безопасность населения, но и не позволяет определить и сравнить те области (объекты), где необходимы меры по снижению риска.

В современных подходах при оценке риска важным этапом является определение моделируемых событий. Для оценки их вероятностей существуют два основных подхода:

- использование имеющихся сведений об авариях или отказах систем (анализ аварийности);

- анализ протекания аварии с целью нахождения необходимой вероятности.

Основной концепцией анализа риска является построение множества сценариев возникновения и развития аварий с последующей оценкой частот реализации и определением масштабов последствий каждого из них.

Произведённые расчёты в рамках исследовательской работы позволили сделать вывод, что самым вероятным сценарием развития чрезвычайной ситуации является объёмный взрыв и возникновения пожара, в результате образования небольшого отверстия в корпусе резервуара ниже уровня наполнения, вследствие чего возможно истечение жидкой фазы под давлением в обвалование резервуара. В последующем происходит испарение с поверхности разлива, образование газо-воздушной смеси (ГВС). Наличие источника воспламенения и бездействие персонала могут повлечь за собой объёмный взрыв ГВС и возникновение пожара. Это же событие является и наиболее опасным, т.к. объёмный взрыв может произойти из-за наличия газо-воздушного облака, сформированного при испарении бензина, что объясняет колоссальные масштабы возможного развития аварии.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. с использованием комплексного подхода разработаны программные мероприятия по уменьшению риска и смягчению последствий возникновения потенциально возможных чрезвычайных ситуаций.
2. рассчитаны вероятности наиболее опасных и наиболее вероятных сценариев развития чрезвычайных ситуаций на автотранспортном предприятии;
3. с использованием графоаналитического метода анализа рисков установлены пути снижения опасных и наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций.
4. рассмотрены возможные сценарии развития аварий, основные причины возникновения чрезвычайных ситуаций, связанные с разгерметизацией технологического оборудования и объектов хранения нефтепродуктов.

Предложенный подход с использованием графоаналитического метода анализа рисков, рекомендуется для использования на других предприятиях аналогичного профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайнуллин А.М., Гильманов Р.З., Гараева Г.И. Об основных источниках загрязнения водных объектов соединениями ртути // Инноваци-

онные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов. Казань. 2021. С. 1339-1344.

2. Зайнуллин А.М. Повышение экологической безопасности производств энергонасыщенных веществ // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов. Казань. 2021. С. 1957-1961.

3. Zainullin A.M. Increasing the environmental safety of the initiating explosives production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. «Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World» 2021. С. 012-015.

4. Zainullin A.M., Truhan O.V., Khusainov R.M. Some features of the synthesis and coagulation treatment wastewater from the tnrs production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. «Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World» 2021. С. 012-033.

5. Зайнуллин А.М., Хусаинов Р.М., Хусаинова Э.Р. О необходимости повышения экологической безопасности производств энергонасыщенных материалов // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы I Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле. Сарапул. 2020. С. 375-378.

6. Шайхиев И.Г., Гатина Ф.И., Зайнуллин А.М., Назмутдинова Г.М. Коагуляционная очистка сточных вод производства тринитрорезорцината свинца // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2015. № 1-2 (63-64). С. 65-66.

7. Зайнуллин А.М. Экологическое сопровождение промышленного производства диазодинитрохинона: дис. ... канд. тех. наук. Казань, 2006.

8. Зайнуллин А.М., Шайхиев И.Г., Фридланд С.В. Исследование каталитической очистки сточных вод производства диазодинитрохинона // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 7. 46 с.

9. Зайнуллин А.М., Шайхиев И.Г., Фридланд С.В. Сорбенты для очистки сточных вод производства диазодинитрохинона // Экология и промышленность России. 2004. № 6. 20 с.

С.М. Романова, доц., канд. хим. наук;
Л.А. Фатыхова, доц., канд. хим. наук
(ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия)

УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ПРОДУКЦИИ

В процессе производства сложных азотнокислых эфиров целлюлозы образуются значительные объемы твердых отходов, таких как обводненный шлам. Эти промышленные отходы могут включать остатки исходного сырья, промежуточные и некондиционные продукты, содержащие нитраты целлюлозы. Их объем может достигать 500 тысяч тонн в год, что представляет собой серьезную экологическую и технологическую проблему, требующую внимательного подхода к их утилизации и переработке.

Состав отходов разнообразен: он включает мелкие частицы нитрата целлюлозы (от 8 до 50%) и неорганические компоненты, такие как ионы кремния, карбонат кальция, оксиды алюминия и железа (от 10 до 50 %). Влажность шлама варьируется от 50 до 70 %, а увлажнённый осадок, извлечённый из шламонакопителей, имеет торфоподобную структуру и характерный коричневый оттенок [1].

Проблема усугубляется наличием в шламе нитросоединений, нитрат ионов и других токсичных веществ, и их поступление в природную среду, может привести к загрязнению почвы и водоемов, а также негативно сказаться на флоре и фауне. Например, нитраты способствуют эвтрофикации водоемов, что вызывает избыточный рост водорослей и ухудшение качества воды.

Особенности состава шлама, особенно наличие нитратов целлюлозы, представляет основную угрозу для экосистемы. Эти соединения обладают высокой устойчивостью в окружающей среде, что способствует их накоплению в почвах и донных отложениях. Кроме того, нитраты целлюлозы имеют канцерогенные, мутагенные и тератогенные свойства. Исследования показывают, что они оказывают острое токсическое воздействие на некоторые виды гидробионтов, такие как *Daphnia similis* и *Danio rerio*, при сбросах сточных вод с производств нитроцеллюлозы [2]. Накопление таких отходов с высокой стойкостью и токсичностью создает потенциальную техногенную опасность, как для промышленных объектов, так и для окружающей среды. Это подчеркивает необходимость

разработки и внедрения эффективных методов утилизации этих отходов для минимизации их негативного воздействия.

Нитраты целлюлозы с истекшим сроком хранения утилизируются, как правило, следующими основными методами: уничтожением путем подрыва, затоплением, сжиганием в специализированных печах.

Из анализа множества научных исследований [3-8] можно заключить, что химическая модификация азотнокислых эфиров целлюлозы является одним из ведущих направлений в исследованиях последних лет, своевременность которого определяется, прежде всего, необходимостью решения экологических задач производства нитратов целлюлозы, а также возможной конверсией специальных производств. Среди методов утилизации устаревших нитратов целлюлозы их химическая модификация на сегодняшний день является наиболее перспективной с точки зрения экологической безопасности и экономической целесообразности.

Особенности строения молекул нитратов целлюлозы, заключающиеся в наличие функциональных групп, таких как нитратные и гидроксильные предполагает протекание реакции переэтерификации [9]. Благодаря наличию в нитратах целлюлозы реакционноспособных $-\text{ONO}_2$ групп существует возможность замещения их иными фрагментами. При этом в той или иной степени протекают четыре типа реакций: реакции по собственно нитратным группам; реакции по имеющимся свободным гидроксильным группам; реакции по гликозидным связям, приводящие к деструкции полимерной цепи; раскрытие цикла глюкопиранозы [10].

В научной литературе опубликованы сведения о взаимодействии азотнокислых эфиров целлюлозы с хлорангидридами карбоновых кислот ароматического и алифатического рядов в присутствии катализаторов – кислот Льюиса (SnCl_4 , AlCl_3 , SbCl_5 , TiCl_4 , ZnCl_2 , $\text{BF}_3 \cdot \text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) [11]. Однако, использование в реакции дорогостоящих катализаторов усложняет процесс и требует дополнительных усилий на их улавливание и регенерацию. Исходя из этого, нами [12] разработан метод химической модификации нитроцеллюлозы хлорангидридом уксусной кислоты без применения катализаторов в среде пиридина, который образует с уксусным хлорангидридом комплекс $[\text{C}_5\text{H}_5\text{NCOOC}_2\text{H}_3]\text{Cl}$. Применение активного ацилирующего комплекса ускоряет процесс образования ацетилнитрата целлюлозы, что позволяет проводить реакцию в условиях, не требующих высоких температур и длительного времени выдержки, при этом пиридин в реакциях ацетилирования выполняет роль катализатора.

С учетом направления производственной деятельности, ориентированного на энергосбережение и рациональное использование ресурсов,

а также тенденции перехода к наилучшим доступным технологиям и экономике замкнутого цикла, производство лаковой основы из некондиционных отходов специализированной химии представляется наиболее экологически и экономически выгодным. В связи с этим проведено исследование химической модификации нитрата целлюлозы хлорангидридом пропионовой кислоты и рассмотрена возможность использования полученного модификата – сложного смешанного эфира целлюлозы пропионилнитрата целлюлозы (ПНЦ) в качестве дополнительного пленкообразователя эмали марки НЦ-218. Согласно ГОСТ 4976-83 эмаль марки НЦ-218 предназначены для отделки мебели и других изделий из древесины, эксплуатируемых внутри помещения, с последующей полировкой.

Проведенные исследования показали, что замена части пленкообразователя на ПНЦ позволяет значительно снизить расход эмали. Это, вероятно, связано с молекулярно-массовой однородностью ПНЦ. Высокая однородность молекулярной массы способствует равномерному распределению полимерных цепей в пленке, что в свою очередь улучшает механические характеристики, такие как прочность и эластичность. Кроме того, однородная молекулярная структура позволяет достичь более стабильных свойств при нанесении эмали, что приводит к улучшенной укрывистости и равномерному покрытию поверхности. Это может снизить количество необходимых слоев покрытия, тем самым сокращая расход материалов и время нанесения. Таким образом, использование ПНЦ не только повышает укрывистость, но и оптимизирует расход материалов, что является важным аспектом в производстве лакокрасочных изделий. В связи с чем, были получены опытные образцы нитроэмали марки НЦ-218. Пленкообразователь эмали образца I имел состав: лаковый сухой коллоксилин – 0,9; ПНЦ – 0,1 (масс. части). Пленкообразователь эмали образца II имел состав: лаковый сухой коллоксилин – 0,85; ПНЦ – 0,15 (масс. части). Полученные образцы нитроэмали испытаны на соответствие ГОСТ Р 51691-2008, ГОСТ 6631-74.

Доля нелетучих веществ, отражающая содержание пигментов, наполнителей, специальных добавок и связующего, то есть компонентов, из которых формируется красящая пленка и которые остаются на поверхности после испарения растворителей, у исследованных образцов находится в пределах нормы. Это связано с тем, что ПНЦ, по сравнению с НЦ, обладает более высокой химической устойчивостью и менее подвержен значительной потере массы при хранении.

Замена части пленкообразователя на ПНЦ позволяет сохранить условную вязкость в рамках стандартов ГОСТ, несмотря на то, что вязкость ПНЦ ниже, чем у исходного нитрата целлюлозы (примерно в 1,5 раза). При этом условная вязкость при замене 15 % пленкообразователя оказывается ниже, чем при замене на 10%. Результаты испытаний образцов с частичной заменой пленкообразователя на ПНЦ в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ Р 51691- 2008, ГОСТ 6631-74.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование модифицированных сложных смешанных азотнокислых эфиров целлюлозы в составе нитроэмалей не только не ухудшает свойств пленки в соответствии с требованиями ГОСТ, но и снижает затраты на производство. Кроме того, этот подход помогает решить проблему накопления и хранения, пожароопасных многотоннажных отходов специальных производств, что, безусловно, представляет интерес, как вариант ресурсосбережения и замкнутого цикла производства.

Полученные результаты исследования имеют практическое значение. Основываясь на них, можно улучшить характеристики нитропленки, не ухудшая ее качества. В частности, возможно, добиться таких положительных свойств, как пониженная горючесть и сокращение расхода эмали при производстве благодаря улучшенной укрывистости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валишина З.Т., Романова М.А., Гафарова Г.Х. Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 9. С. 140-143.
2. Chatterjee S., Deb U., Datta S., Walther C. Chemosphere. 2017. Vol. 184. P. 438—451.
3. Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Валишина З.Т., Галиуллина Г.Н., Косточко А.В. Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 18. С. 80-86.
4. Романова С.М., Мадякина А.М., Сабирова Д.И. Химия растительного сырья. 2017. № 2. С. 19-34.
5. Романова С.М., Фатыхова Л.А., Сабирова Д.И. Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 4. С. 129-131.
6. Голубев А.Е., Кувшинова С.А., Бурмистров В.А. Российский химический журнал. 2015. Т. 59, № 5. С. 98-112.
7. Кувшинова С.А., Голубев А.Е., Бурмистров В.А. Российский химический журнал. 2016. Т. 60, № 1. С. 69-84.
8. Романова С.М., Фатыхова Л.А. Журнал Сибирского Федерального Университета. Химия. 2014. Т. 7, № 1. С. 151-158.

9. Романова С.М., Фатыхова Л.А., Мартышкин К.Н. Вестник КТУ. 2017. Т. 20, № 13. С. 5-11.
10. Романова С.М., Фатыхова Л.А. Известия высших учебных заведений. 2021. Т. 64, № 5. С. 30-34.
11. Романова С.М., Фатыхова Л.А. Вестник технологического университета. 2023. Т. 26, № 12. С. 23-30.
12. Поляков А.И. Высокомолекулярные соединения. 1972. Т. 6. С. 1278-1282.

УДК 628.381.1

В.Н. Марцуль, проф., канд. техн. наук;
И.В. Войтов, проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛИЗАЦИИ И ОБРАЩЕНИЯ С НИМИ

Одной из актуальных проблем в области охраны окружающей среды, является обеспечение норм экологической безопасности при обращении с осадками очистных сооружений канализации (ОСК). Особенностью данного вида отходов является сложный многокомпонентный состав и уникальные свойства. С одной стороны – это опасные отходы, обращение с которыми требует соблюдения специальных мер предосторожности, с другой – ценный возобновляемый ресурс.

Осадки характеризуются весьма ценными агрохимическими свойствами, достаточно высокой теплотой сгорания, что позволяет их рассматривать в качестве ценного материала, использование которого при соблюдении определенных условий может способствовать решению проблем ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

С обработкой, подготовкой к использованию, транспортировкой и другими операциями с ОСК связано воздействие на окружающую среду, которое обусловлено выбросами загрязняющих (в том числе дурнопахнущих) веществ и парниковых газов в атмосферный воздух, значительным энергопотреблением, отчуждением земельных ресурсов, загрязнением подземных вод и др. Однако при выборе соответствующих технологических решений и оборудования решение проблемы осадков может внести конкретный вклад в становление экономики замкнутого цикла и достижение углеродной нейтральности водопроводно-канализационного

хозяйства. Последнее связано с возможностью организации на основе ОСК получения органоминеральных и фосфорсодержащих удобрений, использованием их для производства тепловой и электрической энергии, созданием энергетических плантаций короткого цикла ротации.

Выбор направлений использования ОСК определяется действующей нормативной правовой базой, регулирующей отношения в области обращения с отходами, доступностью соответствующих технологий и оборудования, экономическими факторами. В международной правовой практике ОСК и близкие им по составу осадки сточных вод ряда производств относятся к группе отходов, обращение с которыми регулируется отдельными нормативными правовыми актами [1, 2].

Одним из основных направлений использования осадков, которое апробировано на практике во многих странах, является использование на земле: растениеводство, получение почво-грунтов различного назначения; рекультивация нарушенных земель на объектах заверщенного строительства, промышленного производства, добычи полезных ископаемых и др.; лесное хозяйство, в том числе создание энергетических плантаций; озеленение и благоустройство территорий, цветоводство и др.

Несмотря на очевидную привлекательность этого направления, ввиду сложного многокомпонентного состава и практической невозможности нормировать содержание значительного количества веществ, входящих в состав ОСК (в ОСК крупных городов идентифицировано более 700 веществ) в ряде стран от него постепенно отказываются. Это связано со сложностью выполнения всех условий и ограничений, которые должны быть соблюдены. К факторам, ограничивающим площадь земель, доступных для использования осадков, относятся [1, 2]: предельные значения концентраций тяжелых металлов в осадках; максимальная годовая нагрузка по каждому нормируемому тяжелому металлу, создаваемая при внесении осадка в почву; максимальное количество осадков (по сухому веществу), вносимых в почву на единицу площади в год; требования по содержанию патогенов или использование определенной обработки, после которой патогенные микроорганизмы в осадках практически отсутствуют; регламентация технологии обработки осадка перед их использованием; минимальная частота анализа состава осадков; получение разрешения на использование необработанных осадков на почве; регламентация продолжительности периода между использованием (внесением) осадка и выпасом скота, сбором урожая и продукции, которая находится в непосредственном контакте с осадком и потребляется в сыром виде; ограничения (специальные требования) при использовании осадков на

почвах с рН ниже 6; использование осадков в условиях, обеспечивающих защиту поверхностных и подземных вод; проведение анализа почвы и осадков с определением установленных показателей и доведением их до потребителей; документальное оформление всех стадий жизненного цикла ОСК.

Значительная теплотворная способность, сравнимая при соответствующей подготовке осадков с теплотворной способностью торфа и древесных пеллет, позволяет их использовать в теплоэнергетических установках. Сжигание ОСК может производиться как совместно с твердым топливом (бурые угли, каменный уголь), промышленными отходами, твердыми коммунальными отходами, так и как моносжигание. Осадки используются в качестве топлива в промышленных установках (производство цемента и др.).

Одним из вариантов реализации энергетического потенциала ОСК является получение биогаза и его использование в качестве топлива в когенерационных установках, для получения биометана. Установки энергохимической переработки ОСК (пиролиз, газификация и др.) находятся в стадии опытно-промышленной эксплуатации.

Для подготовки осадков к использованию применяются уплотнение, сгущение (с реагентным кондиционированием и без); механическое обезвоживание (с кондиционированием); анаэробное сбраживание (мезофильное и термофильное); компостирование; другие, кроме анаэробного сбраживания, способы стабилизация (известкование, аэробная стабилизация, выдержка на иловых площадках и др.).

Важнейшей операцией, обеспечивающей транспортировку и подготовку к использованию осадков, которые представляют собой агрегативно и седиментационно устойчивые суспензии гидрофильных веществ, является механическое обезвоживание. Для него используются мешочные фильтры, геотубы, ленточные фильтр-прессы, центрифуги, камерные и гидравлические фильтр-прессы. Для повышения эффективности этого процесса совершенствуются технологии кондиционирования осадков перед обезвоживанием, используются системы управления процессом обезвоживания осадка на основе искусственного интеллекта и непрерывного измерения содержания воды в обезвоженном осадке в режиме реального времени, разрабатываются и производятся более совершенные системы механического обезвоживания.

Анаэробное сбраживание является распространенной технологией, обеспечивающей получение биогаза и биоудобрения. Совершенствование этой технологии идет в направлении повышения выхода биогаза за

счет предварительной подготовки осадков (механическая дезинтеграция осадка – ультразвук, гидромеханическая обработка; термическая предварительная обработка – термогидролиз; химическая обработка – щелочной или кислотный гидролиз и др.; комбинированные методы), совместного сбраживания с отходами, содержащими биополимеры (коферментация). Например, использование самого распространенного в настоящее время процесса предварительной подготовки осадков к сбраживанию методом термогидролиза (установки фирмы SAMBI – 91 установка в 28 странах мира) обеспечивает повышение выхода биогаза на 30-40% при сокращении продолжительности процесса и увеличении удельной нагрузки на метантенк. Это позволяет в значительной степени удовлетворить потребности очистных сооружений в тепловой и электрической энергии.

Иловые воды, образующиеся в процессах уплотнения и механического обезвоживания обработанных и необработанных осадков, характеризуются высоким содержанием фосфатов и азота аммонийного, для извлечения которых разработано более 30 технологий. На большинстве действующих установок (например, фирмы OSTARA – 23 установки) они извлекаются в виде кристаллического магний аммоний фосфата [3].

Большинство технологий по обработке и подготовке к использованию ОСК достаточно сложны, требуют дорогостоящего оборудования и соответствующей подготовки персонала. Экономическая эффективность их использования в значительной степени зависит от объема образующихся осадков. Анализ существующей ситуации с обращением с осадками в Республике Беларусь свидетельствует о том, что для Беларуси есть реальный шанс использовать современные технологии обработки осадков, позволяющие не только решить проблему ОСК, но и получить определенный как экологический, но и экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.
2. Стандарт США по использованию и удалению осадков сточных вод (40 CFR PART 503 «Standards for the use or disposal of Sewage Sludge»).
3. A. Witek-Krowiak, K. Gorazda, D. Szopa, K. Trzaska, K. Moustakas, K. Chojnacka. Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview. *Bioengineered*. 2022 Jun 5;13(5). P. 13474–13506.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЫТЫХ ЛАГУН ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Промышленное животноводство вносит существенный вклад в негативное воздействие на окружающую среду. В значительной степени оно связано с тем, как организовано обращение с навозом, в частности с бесподстилочным навозом. При хранении навоза в атмосферный воздух выделяются диоксид углерода, аммиак, оксиды азота, метан, сероводород, меркаптаны и другие соединения [1]. В этом перечне представлены как основные парниковые газы (диоксид углерода, метан), так и дурнопахнущие вещества (сероводород, меркаптаны). Выбросы последних представляет серьезную социальную и экологическую проблему, так как оказывают существенное влияние на качество жизни населения, ограничивают выбор площадок для размещения соответствующих объектов. Аналогичная проблема имеет место при размещении на объектах хранения нестабилизированных осадков очистных сооружений канализации.

Учитывая важность использования навоза как высококачественного органического удобрения, а также вовлечения в хозяйственный оборот осадков очистных сооружений канализации требуется организовать обращение с ними таким образом, чтобы уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и получить качественное удобрение или почвоулучшающую добавку.

Технологией, обеспечивающей существенное снижение выбросов в атмосферный воздух, стабилизацию и частичное обеззараживание обрабатываемых субстратов, является анаэробное сбраживание. При этом органическое вещество преобразуется в биогаз, обладающий значительным энергетическим потенциалом, и биоудобрение. Анаэробное сбраживание в мезофильном режиме является одной из наиболее отработанных на практике технологий, которая доказала свою эффективность при сбраживании как осадков очистных сооружений, так и отходов животноводческих комплексов. В республике функционирует три биогазовых комплекса, использующих в качестве субстрата осадки очистных сооружений и более десяти биогазовых установок, перерабатывающих отходы животноводства. Дальнейший рост числа таких установок сдерживается значительными капитальными затратами и ограничениями по производитель-

ности, так как минимальная экономически оправданная производительность биогазового комплекса достаточно высока.

Альтернативой биогазовому комплексу с метантенками являются крытая лагуна с системой использования биогаза. Крытая лагуна представляет собой бассейн (лагуну) с гидроизолированным основанием, который укрыт гибкой мембраной из полиэтилена высокой плотности или полипропилена. Срок службы мембраны составляет около 20 лет. Мембрана может быть закреплена на бетонном бордюре по периметру или укреплена в траншее по периметру лагуны. Глубина крытой лагуны может составлять 3,5-5,0 м [2-5].

Покрытие проектируется и устанавливается таким образом, чтобы дождевая вода не скапливалась, а самопроизвольно или принудительно удалялась с его поверхности в подходящую емкость. Лагуна может работать в периодическом режиме или непрерывно.

Опыт практического применения таких систем показал, что лагуну, где организовано анаэробное сбраживание, целесообразно использовать в паре с емкостью, где накапливается жидкая фракция дигестата. Эта емкость также может быть укрытой. Биогаз удаляется с крытой лагуны после накопления его достаточного объема и используется для производства тепловой и электрической энергии в когенерационной установке. Аварийные газоотводы могут потребоваться для выпуска биогаза и его сжигания на факельной установке, если он не извлекается и не используется длительное время.

В крытых лагунах обычно обрабатывается жидкий навоз, осадки сточных вод или сточные воды с высокой концентрацией загрязняющих веществ. Раз в год или реже производят очистку лагуны от осадка.

Основными факторами, которые оказывают влияние на выход биогаза, являются температура и время удержания обрабатываемых потоков. Так как температура существенно изменяется по месяцам и сезонам года, то и выход биогаза подвержен значительным колебаниям, что является одной из проблем, которые нужно учитывать при выборе режима работы установки. Обычно время удержания составляет до 100 суток, однако для условий Беларуси оно может быть существенно больше. При оценке экономических показателей системы анаэробного сбраживания с использованием крытых лагун нужно ориентироваться на холодный период года, когда сезонное снижение выхода биогаза наиболее заметно.

Опыт эксплуатации систем анаэробного сбраживания различных субстратов, в первую очередь жидкого навоза крупного рогатого скота и

свиней, показал, что крытые лагуны как анаэробные реакторы имеет ряд явных преимуществ перед метантенками, связанных с более низкими затратами на строительство и эксплуатацию. Они позволяют решить задачу существенного снижения выделения дурнопахнущих веществ и парниковых газов, обеспечить стабилизацию обрабатываемых субстратов и их последующее эффективное использование.

Учитывая актуальность проблем, которые могут быть решены при массовом применении крытых лагун для обработки жидкого навоза и осадков очистных сооружений, необходимо определить основные показатели работы таких систем в условиях Беларуси. Для этого необходимо выполнить комплекс исследовательских работ по оценке биогазового потенциала различных субстратов при различных температурных режимах и временах выдержки, разработать проектные решения по пилотному проекту для одного из объектов с учетом имеющегося опыта эксплуатации биогазовых комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu J. A review of microbiology in swine manure odor control // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2000. Vol. 78. P. 93-106
2. Waste Stabilisation Pond Design Manual [Электронный ресурс] / Sewage Treatment / Sanitary Sewer. URL: <https://ru.scribd.com/document/357014730/Waste-Stabilisation-Pond-Design-Manual> (дата обращения 18.01.2025).
3. An evaluation of a covered anaerobic lagoon for flushed dairy cattle manure stabilization and biogas production [Электронный ресурс]. URL: https://www.build-a-biogas-plant.com/PDF/Lagoon_flushed_dairy_cattle.PDF (дата обращения: 19.01.2025)
4. Construction and Operation of the ABEC #3 Covered Lagoon Digester and Electrical Generation System [Электронный ресурс]: URL: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-500-2020-077.pdf> (дата обращения 19.01.2025).
5. Development of a Methane Conversion Factor to Estimate Emissions from Animal Waste Lagoons [Электронный ресурс]: URL: <https://www3.epa.gov/conference/ammonia/mangino.pdf> (дата обращения 19.01.2025).

Е.Н. Макеева, канд. техн. наук, зав. кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика и экология»;
О.Ю. Морозова, ст. преп. (ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель)

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ПЕЧНОГО БЫТОВОГО ТОПЛИВА

В качестве резервного или аварийного источника топливоснабжения котельных и ТЭЦ длительное время являлся мазут, который фактически был стратегическим видом топлива, вследствие чего вопрос о его замене на какой-либо альтернативный вариант даже не рассматривался [1]. Однако, по решению Республиканской комиссии по контролю за осуществлением расчетов за природный газ, электрическую и тепловую энергию Совета Министров Республики Беларусь от 26.06.2011 года, в целях экономии топливно-энергетических ресурсов Министерству энергетики было поручено исключить сжигание топлива на поддержание мазутного хозяйства на пиковых котельных.

Кроме этого, вопрос, связанный с заменой резервного мазутного источника топливоснабжения пиковых котельных на альтернативный, очередной раз остро встал после получения рекомендаций Гомельского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды от 17.05.2018 года, в связи с тем, что массовая доля выбросов серы в окружающую среду, образуемая при сжигании мазута является крайне высокой (для мазута используемой марки М-100 составляет от 2,5-3% и более).

В связи с вышеизложенным была выполнена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива в соответствии с ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт» [2].

В соответствии с ТКП 17.02-XX-2019 «Охрана окружающей среды и природопользование. Наилучшие доступные технические методы для топливосжигающих установок теплоэнергетики» наиболее значимыми видами выбросов при сжигании органического топлива являются SO₂, NO_x, CO, твердые частицы и парниковые газы, такие как CO₂. Другие вещества, например, тяжелые металлы, фтороводород, галоидные соеди-

нения, несгоревшие частицы углеводородов, неметановые летучие органические соединения и диоксины выбрасываются в меньших количествах, однако могут оказывать значительное влияние на состояние окружающей среды из-за их токсичности или устойчивости [3].

Используемые для расчета характеристики мазута и печного бытового топлива приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики жидкого топлива согласно ТКП 17.08-04-2006

Наименование	Вид	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_n^r
		W_t^r	A^r	S^r	C^r	H^r	N^r	O^r	
Мазут малозольный	вид VI	1	0,04	2,7	82,4	13,16	-	0,7	39,64
Печное бытовое топливо	вид В	-	0,02	0,04	84,3	15,46	-	0,18	42,30

Для расчета были использованы данные из задания на проектирование по объекту: «Реконструкция топливного хозяйства РК «Черниговская» по ул. Черниговская, 22а в г. Гомеле» от 28.09.2018 и дополнения №1 к заданию на проектирование по объекту: «Реконструкция топливного хозяйства РК «Черниговская» по ул. Черниговская, 22а в г. Гомеле» от 01.09.2020 [4].

Расчеты проводились с учетом того, что оксиды серы в котле летучей золой не связываются, золоуловители и сероулавливающие установки не используются. Максимальный расчетный расход топлива принимаем равным 5,9 т/ч [4, 5]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экологические параметры загрязняющих веществ

Вид загрязняющего вещества	Вид топлива	
	мазут	печное бытовое топливо
Количество серы диоксида M_{SO_2} , г/с	88,575	1,312
Суммарное количество азота оксидов M_{NO_x} в пересчете на азота диоксид (NO_2), г/с	2,175	2,424
Количество углерода оксида M_{CO} , г/с	3,75	4,007
Количество твердых частиц		
количество сажи M_c , г/с	0,4	0,21
количество мазутной золы в пересчете на ванадий M_v , г/с	0,146	-

В результате сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие ос-

новным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам за счет уменьшения в 70 раз количества выброшенного в атмосферный воздух диоксида серы за 10 суток сжигания топлива, а также снижения концентрации данного вида выброса в 72,5 раза.

Кроме того, обеспечивается уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы при десятидневном использовании нового резервного вида топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозова, О. Ю. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме / О. Ю. Морозова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 142–145.

2. ТКП 17.08-04-2006 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт», 2006.

3. ТКП 17.02-XX-2019 «Охрана окружающей среды и природопользование. Наилучшие доступные технические методы для топливосжигающих установок теплоэнергетики», 2019.

4. Схема теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года: в 3 т. / сост.: А. Н. Рыков, О. А. Бушкевич. – М.: Проектное научно-исследовательское республиканское предприятие «БелНИПИЭнергоПром». 2018. – Т. 1. – ч. 1. – 230 с.

5. Макеева, Е. Н. Перевод котельных на альтернативное топливо / Е. Н. Макеева, Э. Р. Зверева, О. Ю. Морозова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т.26, № 1. – С. 107–117.

ТЕМПЛАТНЫЙ СИНТЕЗ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ

В последнее время появляются сообщения, что металлоорганические каркасные соединения (MOF) могут выступать в качестве предшественника или удаляемой матрицы для получения оксидов с высокой удельной площадью поверхности, контролируемой структурой и регулируемым размером пор после их термического разложения в контролируемой атмосфере [1]. Преимущества использования MOF в качестве таких шаблонов (предшественников) заключается в возможности обеспечивать, в этом случае, разнообразную архитектуру путем преобразования местоположений ионов металлов и органических лигандов. Причем при прокаливании обеспечивается сохранение прежней архитектуры металлоорганического соединения и его высоких показателей удельной поверхности (рис.1).



Рисунок 1 – Схема темплатного синтеза:
1 – исходный MOF; 2 – пористый оксид [1].

Широкое использование, рассматриваемого в данной работе, оксида алюминия обусловлено его структурными особенностями, дисперсностью, состоянием поверхности. Данные свойства обеспечивают этому материалу устойчивый спрос в разных отраслях промышленного производства, например, производство катализаторов (дегидратации спиртов, изомеризации олефинов, разложения H_2S) и носителей катализаторов (таких как Co-MoO_3 , Pd , Pt), осушителей газов (например, H_2 , Ar , C_2H_2), адсорбентов жидкостей (например, ароматических углеводородов, керосина) [2]. Важно отметить, что для таких применений ставится задача иметь не только высокодисперсный Al_2O_3 , но и материала, обладающий

прочным каркасом межпористой матрицы. Использование порошков, полученных с помощью темплатного синтеза из MOF, в процессе спекания которых происходит формирование структур с высокой прочностью связи на границах зерен, составляющих керамический каркас, может стать одним из решений этой проблемы.

Для исследования процесса синтеза оксида алюминия порошок фумарата алюминия, приготовленный из водных растворов гидроксида натрия и фумаровой кислоты, подвергался термообработке в диапазоне температур 100–1100 °С. Рентгенограммы полученных образцов записывались на дифрактометре ДРОН-2.0 с использованием $\text{Co(K}\alpha\text{)}$ излучения ($\lambda = 0,178896$ нм) и Ni-монокроматора, в интервале углов $2\theta = 10\text{--}90^\circ$. Микроструктура и концентрации составляющих элементов определялись с использованием микроскопа LEO 1455 VP. Дифференциально-термический анализ порошков в рассматриваемых системах был проведён на приборе STA449C Jupiter (Netzsch, Германия). Поглощение воды MOF измеряли с помощью анализатора влажности MAX 50 Radwag. Исследуемый порошок помещали в камеру с влажностью 90 % при 20 ± 1 °С на 24 ч, переносили в чашу весов анализатора и нагревали до 80 °С до постоянной массы.

Исходный фумарат алюминия представляет собой порошок белого цвета, первичные частицы которого являются кристаллитами дендритной формы с размерами от 0,5 до 2,5 мкм. ДТА анализ свидетельствует о том, что при нагревании он разлагается в диапазоне температур 350–450 °С. С целью удаления органической составляющей из таких образцов проводилась их термообработка на воздухе при температурах 300, 500, 800, 1100 °С. Предполагалось, в данном случае должно было произойти окисление алюминия в MOF до его оксида. При этом морфология кристаллитов должна унаследовать пористость и большую удельную поверхность характерную для предшественника - фумарата алюминия (рис. 1). Известно, что окисление алюминия в рассматриваемых условиях протекает легко, так как изменение стандартной энергии Гиббса для реакции $4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$, протекающей при температурах 300–1100 °С находится в пределах от -850 до -950 кДж/моль. Структурная трансформация MOF в процессе их термической обработки относительно проста и связана с конденсацией и разложением органических компонентов. В среде окислительного газа, например, при прокаливании на воздухе, углеродный компонент будет легко окислен в газообразную смесь CO_2/CO и будет выходить из каркаса. Каркасная же структура в этом случае по-

степенно замещается атомами оксида металла. Конечно для сохранения этой пористой структуры MOF следует уделять внимание скорости нагрева.

Состав фаз, исследуемых порошкообразных образцов фумарата алюминия после их термообработки, был определен методом рентгенофазового анализа. Установлено, что дифракционные рефлексы для фумарата алюминия, соответствующие плоскостям отражения, совпадают с расположением рефлексов в стандартной структуре Al-фумарата. РФА анализ показал, что термообработка при температуре 300 °С привела лишь к частичному разложению фумарата. Оказалось, что после обжига при 500 °С образец имел аморфную структуру. Аморфизация явилась результатом удаления органической составляющей, однако кристаллическая решётка оксида алюминия при такой термообработке ещё не успела сформироваться. Образец при этом имел черные включения, свидетельствовавшие о частичном присутствии в нем не удалённого углерода. При температуре 1100 °С фумарат алюминия почти полностью превратился в оксид алюминия с незначительной долей сопутствующей фазы Na₂SO₄, присутствовавшей и в исходном образце фумарата алюминия.

Подтверждением сохранения каркасной структуры и пористости оксида алюминия, полученного по данной методике явились результаты исследования процессов влагопоглощения исследуемыми образцами, приведенные в таблице.

Таблица – Результаты влагопоглощения исследуемых образцов

Образцы	% потери массы при 120 °С	Время выдержки до постоянной массы, мин.	Влагопоглощение, г/г
Al-фумарат	37,6	15	0,7900
Al ₂ O ₃ /1100 °С	36,3	7,5	0,5722
Al ₂ O ₃ /300 °С	38,1	7	0,6171
Al ₂ O ₃ /500 °С	39,0	4	0,6410

Оказалось, что синтезированный оксид алюминия имеет величину влагопоглощения, лишь незначительно отличающуюся от влагопоглощения образцом фумарата алюминия. Вероятно, в этом случае его удельная поверхность будет достаточно велика, так как удельная поверхность по BET фумарата алюминия, синтезированного по этой методике в наших предыдущих исследованиях, была высокой и составляла 2290 м²/г.

Возможность синтеза оксида алюминия при температуре термообработки 1100 °С подтверждает и его ИК-спектр. Было установлено, что

полосы поглощения при 640, 600, 490 и 460 см^{-1} являются типичными для ИК-спектра α -глинозема [3]. Интенсивная же широкая полоса вблизи 600-800 см^{-1} , а также сильная полоса при 440 см^{-1} обусловлены растягивающими колебаниями Al–O.

Таким образом с помощью методики темплатного синтеза было показано, что из металлоорганического соединения возможен синтез оксида алюминия. В этом случае он будет обладать каркасной структурой, обеспечивающей высокую степень влагопоглощения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xuezhi Song, Fei-Fei Sun, Shu-Ting Dai Hollow NiFe_2O_4 microspindles derived from Ni/Fe bimetallic MOFs for highly sensitive acetone sensing at low operating temperature // *Inorganic Chemistry Frontiers*. 2018. N10. С. 1039.
2. Desai, R.; Hussain, M.; Ruthven, D.M. Adsorption of water vapour on activated alumina: I—Equilibrium behavior // *Can. J.Chem. Eng.* 1992. N 70. С. 699–706.
3. Subramanian S., Natarajan K.A., Malghan S.G. Surface chemical studies on alumina suspensions using ammonium poly(methacrylate) // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2000. N 164. С.143-154.

УДК 661.847.22

Ш. Р. Рахимкулов, аспирант;
М. А. Самадий, проф., канд. техн. наук
(ТХТИ, г. Ташкент, Узбекистан)
(КИЭИ, г. Карши, Узбекистан)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА ЦИНКА

Оксид цинка (ZnO) – неорганическое соединение, состоящее из цинка и кислорода. ZnO обычно встречается в виде белого кристаллического порошка и является одним из наиболее изученных материалов благодаря своим уникальным свойствам. Его важные свойства, такие как полупроводниковое поведение и наноструктурный потенциал, делают его широко используемым в различных областях, таких как физика, химия и материаловедение.

Физические свойства оксида цинка

Кристаллическая структура ZnO обычно имеет гексагональную (вюрцитную) кристаллическую структуру, но при определенных условиях может также принимать кубическую структуру. Эти структуры влияют на электрические и оптические свойства ZnO. Благодаря высокой температуре плавления (1975 °C) и высокой термической стабильности ZnO широко используется в высокотемпературных приложениях [1].

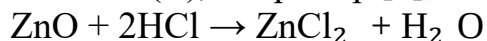
Свойства проводимости Оксид цинка является полупроводником с широкой запрещенной зоной. Его энергия запрещенной зоны составляет около 3,37 эВ, что делает его многофункциональным материалом. Это свойство позволяет использовать ZnO в приложениях, поглощающих ультрафиолет (УФ), оптоэлектронных устройствах и фотоэлектрических системах.

Оптические свойства ZnO используется в различных оптических приложениях благодаря своей высокой эффективности поглощения УФ-излучения и прозрачности. Его оптические свойства позволяют использовать его в солнцезащитных кремах и лосьонах для защиты от УФ-излучения. ZnO также обладает фотолюминесцентными свойствами, то есть он излучает яркий свет под воздействием УФ-излучения [2].

Поверхностная структура и размер оксида цинка могут образовывать наномасштабные структуры, которые позволяют использовать его в качестве фотокатализатора. Наночастицы ZnO имеют большую площадь поверхности, что увеличивает активность реакции. Кроме того, большая площадь поверхности ZnO облегчает его применение в промышленности и биомедицине из-за его сильной адсорбционной способности.

Химические свойства оксида цинка

Химическая стабильность ZnO может реагировать в различных средах, особенно под воздействием кислот и оснований. При реакции с кислотами ZnO образует соли Zn (II), например [3],



В реакции образуется ZnCl₂. ZnO относительно стабилен в основных средах, что делает его пригодным для различных промышленных процессов.

Фотохимические свойства ZnO фотоактивен под действием УФ-излучения и действует как фотокатализатор. Это свойство позволяет использовать ZnO в технологиях очистки окружающей среды, таких как окисление органических загрязнителей в воде и снижение загрязнения воздуха.

Антибактериальные свойства Наночастицы ZnO обладают анти-

бактериальным действием и могут предотвращать рост и размножение микроорганизмов. Это свойство делает ZnO полезным в биомедицинской и косметической областях [4].

Благодаря своим физическим и химическим свойствам ZnO широко используется в различных областях:

- Оптоэлектроника и фотовольтаика: полупроводниковые свойства ZnO позволяют широко и эффективно использовать его в солнечных батареях и светодиодном освещении [5].

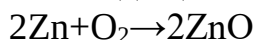
- Промышленность и строительство: ZnO используется в производстве красок, защитных покрытий и керамики.

- Биомедицина и косметика: антибактериальный эффект ZnO и его свойства поглощения УФ-излучения используются в кремах, лосьонах и лаках для ногтей [6].

Существует несколько способов получения оксида цинка (ZnO). Эти методы используются в промышленности и в лабораториях. некоторые распространенные методы специального

Прямое окисление цинка:

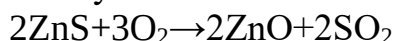
Металлический цинк реагирует с кислородом при высокой температуре с образованием чистого оксида цинка.



Этот процесс достигается путем нагревания металлического цинка при высокой температуре с кислородом.

Разложение карбоната цинка:

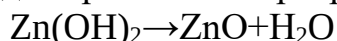
Карбонат цинка (ZnCO_3) разлагается при высокой температуре с образованием оксида цинка и углекислого газа:



Этот метод используется для получения небольших количеств ZnO в лабораториях.

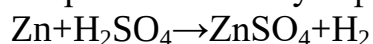
Химическое осаждение и нагрев:

Гидроксид цинка (Zn(OH)_2) образуется в результате реакции солей цинка (например, $\text{Zn(NO}_3)_2$ или ZnSO_4) под действием гидроксида OH, а затем этот гидроксид нагревается и превращается в оксид цинка:



Оксид цинка получают сжиганием сульфида цинка:

Оксид цинка образуется при сжигании сульфида цинка (ZnS).



Оксид цинка (ZnO) является ценным материалом в науке и промышленности благодаря своим уникальным физико-химическим свой-

ствам. Его широкозонное полупроводниковое поведение, фотохимическая активность и антибактериальный эффект позволяют эффективно использовать ZnO в оптоэлектронике, биомедицине и экологических технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Özgür, Ü., Alivov, YI, Liu, C., Teke, A., Reshchikov, MA, Dogan, S., Avrutin, V., Cho, SJ, and Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301.
2. Klingshirn, C. (2007). ZnO: From Fundamentals to Applications. *Physica Status Solidi (b)*, 244 (9), 3027–3073.
3. See DC (2001). Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering: B*, 80(1-3), 383–387.
4. Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Daskalakis, N., Jeuken, L., Povey, M., & O'Neill, AJ, & York, DW (2010). Mechanistic investigation of the antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions against *E. coli*. *Journal of Nanoparticle Research*, 12 (5), 1625-1636.
5. Janotti, A. and Van de Wall, CG (2009). Basics of zinc oxide as a semiconductor. *Progress Reports in Physics*, 72(12), 126501.
6. Wang, ZL (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(25), R829–R858.

СОДЕРЖАНИЕ

Подсекция «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ»

<i>Левицкий И.А.</i> 90 лет силикатному образованию Беларуси	3
<i>Левицкий И.А., Дяденко М.В., Струнец С.В.</i> Лантаносодержащие антибактериальные глазури для керамогранита	6
<i>Дормешкин О.Б., Гаврилюк А.Н., Бышик А.А., Мохорт М.С.</i> Физико-химические особенности щелочной экстракции гуминовых веществ из бурых углей Бринёвского месторождения Республики Беларусь	10
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А., Курило И.И., Лугин В.Г., Глинский А.С., Подсосонная А.Д., Ширвель А.А.</i> Влияние химического состава стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ на их биоактивность и физико-химические свойства	14
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А., Глинский А.С.</i> Сравнительное влияние оксидов MgO , ZnO и SrO на физико-химические свойства стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$	19
<i>Кузьменков М.И., Лукаш Е.В., Шалухо Н.М., Кузьменков Д.М.</i> Анкуда М.К. Перспективы импортозамещения сырьевых материалов для производства портландцемента	24
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А.</i> Теплофизические свойства боросиликатных стекол	26
<i>Левицкий И.А., Дяденко М.В., Козловская А.А.</i> Влияние технологических и оптических характеристик на процессы получения волоконно-оптических изделий	31
<i>Павлюкевич Ю.Г., Ларионов П.С., Панцевич М.В.</i> Стеклокерамические пропанты на основе природного сырья Республики Беларусь	35
<i>Минаковский А.Ф., Холикулов Д.Б., Ниязметов Б.Э., Хамдамов М.Б.</i> Изучение гранулометрического состава окисленных медных руд месторождения «Кальмакир» АО «Алмалыкский ГМК»	38
<i>Холикулов Д.Б., Музаффаров У., Минаковский А.Ф.</i> Утилизация технологических растворов медного производства АО «Алмалыкский ГМК» ...	41
<i>Nadira Yusupova, Abdugaffor Khurmamatov, Salamat Berdimbetov</i> Dependence of heat exchange efficiency during condensation of a vapor-gas mixture on the solid phase concentration using the example of a multicomponent extraction gasoline mixture	46
<i>Умиров Ф.Э., Шодикулов Ж.М., Мажидов Х.Б.</i> ИК-спектроскопический и рентгеноструктурный анализ состава вторичных продуктов производства каустической соды	49
<i>Kholikulov D.B., Boltayev O.N., Elchiyeva M.D.</i> Possibilities of processing of oxidized copper ore at "Almalyk MMC" JSC	51
<i>Чавлиева Ф.Б., Туракулов Б.Б., Эркаев А.У., Кучаров Б.Х., Бобокулов А.Н.</i> Исследование анолита при электролизе хлорида калия в мембранном электролизёре	54
<i>Курагин А.А., Долуда В.Ю.</i> Кинетические особенности и построение кинетических моделей процесса образования синтетических цеолитов на поверхности цеолитов	57

<i>Муталибхонов С.С., Хожиев Ш.Т., Каршибоев Ш.Б., Шайманов И.И.</i>	
Переработка медных шлаков с использованием гидроксида натрия	62
<i>Шарипов С.Ш., Мухиддинов Б.Ф., Данакулова Р.А.</i> Окислительный обжиг	
упорных сульфидных руд месторождения «Ауминзо-Амантай»	65
<i>Гаффоров А.Т., Шарипов С.Ш., Данакулова Р.А., Рузибоев А.Л.</i>	
Обзор состояния производства никель и хромсодержащих продуктов из	
вторичных ресурсов	67
<i>Йулдошева М. Б., Шарипов С. Ш.</i> Глауконит - особо важный минерал в	
народном хозяйстве	70
<i>Koshanova B.T., Erkaev A.U., Toshtemirov A.B., Bobokulov A.N.,</i>	
<i>Eshchenko L.S.</i> Study of the composition of waste sulfuric acid from the PVC	
plants at JSC «NAVOIAZOT»	73
<i>Мамарасулов Б.С., Кошанова Б.Т., Эркаев А.У., Абдурахимова А.У.</i>	
Исследование процесса получения хлорида кальция пригодных для	
применения осушки природного газа	76
<i>Бобокулов А.Н., Эркаев А.У., Кошанова Б.Т., Эшметова Д.З., Гаврилюк А.Н.</i>	
Изучение процесса испарения жидкой фазы при производстве $\text{KН}_2\text{РO}_4$	78
<i>Тошкодирова Р.Э., Кенжаева С.А., Хожиев Ш.Т.</i> Исследование	
извлечения редких металлов из клинкера цинкового производства	81
<i>Мавлянов М.Б., Эркаев А.У., Адилова М.Ш., Бобокулов А.Н.</i> Теоретический	
анализ галургического способа обогащения калийных руд	
Тюбегатанского месторождения	84
<i>Холикулов Д.Б., Хайдаралиев Х.Р., Хожиев Ш.Т., Муталибхонов С.С.</i>	
Термодинамический анализ выщелачивания феррита цинка серной	
кислотой с использованием гидразина сульфата	87
<i>Холикулов Д.Б., Худоймуратов Ш.Ж., Болтаев О.Н., Хожиев Ш.Т.</i>	
Разработка и оптимизация технологий извлечения драгоценных металлов	
из технологических растворов медного производства	91
<i>Рахимкулов Ш. Р., Самадий М. А.</i> Физико-химические свойства и	
способы получения оксида цинка	94
<i>Холикулов Д.Б., Шайманов И.И., Хожиев Ш.Т.</i> Исследование получения	
аморфного диоксида кремния из металлургических отходов	
гидрометаллургическим методом	97
<i>Шодикулов Ж.М., Умиров Ф.Э., Бобокулова Д.З.</i> Изучение	
микроскопических свойств минерала серпентинита Арватенского	
месторождения	101
<i>Абидов И., Хошимов Ф.Ф.</i> Исследование получения мочевины с	
физиологически активными веществами	104
<i>Зулярова Н.Ш., Бобокулова О.С., Кенжаев М.Э., Усманов И.И.</i>	
Технология получения жидкого удобрения и преципитата в одном	
технологическом цикле	109

Подсекция «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

<i>Вайтехович П.Е., Гребенчук П.С.</i> Итоги и перспективы исследования ударного измельчения	111
<i>Панасюк Е.Г., Петров О.А., Мытько Д.Ю.</i> Совершенствование уплотнений роторов центробежных гидромашин	115
<i>Калишук Д.Г., Федарович Е.Г., Левданский А.Э., Саевич Н.П.</i> Экспериментальное определение диапазона оптимальной работы модифицированных ситчатых тарелок	119
<i>Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э.</i> Подбор поверхностно-активных веществ для флотационного разделения смеси частиц полиэтилентерефталата и полифениленсульфида	123
<i>Володин В.И.</i> Методика расчета пластинчато-ребристого теплообменника минимального объема	127
<i>Камалбек Д.К., Волненко А.А., Жидебаев Е.А. Левданский А.Э.</i> Тепломассообмен в газоочистном аппарате при внешнем обтекании трубчатой насадки с прямыми трубами	130
<i>Lankin R.I., Frantskevich V.S., Su Hailong, Liu Xinyu.</i> Influence of the geometry of the element of the movable packing on mass transfer.....	134
<i>Федарович Е.Г., Ярмолик С.В., Левданский А.Э., Нурмухамедов Х.С.</i> Классификация продуктов селективного измельчения стеклопластика	138
<i>Козловский В.И., Кульша Д.В., Вайтехович П.Е.</i> Энергоэффективность вертикальных и горизонтальных бисерных мельниц.....	141
<i>Левданский И.А., Цинь Ц., Чиркун Т.Я., Левданский А.Э.</i> Расчет срыва влаги с поверхности вращающейся шарообразной частицы.....	145
<i>Ганиева С.У., Худайбердиева Н.Ш., Абдулахатов Э.Э., Матчанов Ш.Ш., Нурмухамедов Х.С.</i> Гидравлическое сопротивление вихревого циклона с параллельной подачей фаз	148
<i>Левданский А.Э., Федарович Е.Г., Султанов Ж.В., Шералиева О.А. Нурмухамедов С.Х.</i> Эффективность измельчения бурого угля в турболопастном измельчителе	153
<i>Ташбаев Т.Э., Бекбаева Ф.У., Аннаев Н.А., Нурмухамедов С.Х., Усманов Б.С.</i> Улучшение качества гранул фосфогипса при грануловании в турбулизированном слое	157
<i>Рахмонова М.И., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х. С., Хакимова Г.Н., Нормуминов А.Б.</i> Интенсификация теплопередачи при абсорбции CO ₂ рассолом в колонне с эффективными насадками	161
<i>Францкевич В.С., Нурыллаева А.А., Рахмонова М.И., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С.</i> Влияние скорости жидкости на перенос тепла в колонных с насадками из труб со спиральными турбулизаторами	164
<i>Диссанайке К.А., Нигмаджанов С.К., Нурмухамедов Х.С., Матчонов Ш.К. Самадий М.С.</i> Экспериментальное исследование влияние паровой обработки на качество мясных изделий	168
<i>Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Маршалова Г.С., Островская Д.В.</i> Экспериментальное исследование физического подобия интенсифицированных свободно-конвективных процессов на воздухоохлаждаемых пучках оребренных труб с круглыми ребрами	171

<i>Францкевич В.С., Ланкин Р.И., Махмудов Ш.Б.</i> Изучение конструкций массообменных решеток в абсорберах с подвижной насадкой	175
<i>Mytsko D.Yu, Vaytekhnovich P.E., Petrov O.A., Zhao Xiaoman, Sun Zhengyi</i> Investigation of the wetting of the surface of a regular structured element of a packing	179
<i>Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Грива С.А.</i> Экспериментальные исследования свободно-конвективного теплообмена двухрядного пучка из ребристых труб с различными поперечными шагами их установки в пучке	182
<i>Otakuziev Z.A.</i> Increased drying efficiency	184
<i>Шайымов С.С., Веллиева С.Т.</i> Энергосберегающие технологии в промышленности	188
<i>Хурмаматов А.М., Ахмедова К.Ш., Худойбергенов А.А.</i> Современная двухколонная дистилляционная установка: обзор	191
<i>Промтов М.А., Желудков В.Г.</i> Расчет диаметра частиц эмульсии, полученной в роторном импульсном аппарате	193
<i>Волчек О.М.</i> Технологическая схема подготовки шихты хлористого калия к процессу компактирования	197
<i>Смирнов А.Ю., Гладких С.Н.</i> Текущий уровень и векторы развития солнечной энергетики	200
<i>Дмитриев О.С., Барсуков А.А.</i> Влияние типа армирующего наполнителя на теплофизические свойства полимерных композитов	204
<i>Хусанов А.Е., Иристаев И.Ю., Кенжебеков Д.М.</i> Мультифизическое моделирование теплообменника труба в трубе с турбулизатором потока различного профиля	208

Подсекция «ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ»

<i>Ковганко В. Н. , Дорожук Д. С. , Маслаков А. А.</i> Особенности спектров ЯМР ^1H и ^{13}C соединений ряда 1,3-диарилпиразол-5-онов	213
<i>Сергеевич О. А.</i> Особенности образовательного процесса студентов химико-технологических специальностей при изучении химико-аналитических дисциплин	217
<i>Латыпов Р. С., Болотко Л. В.</i> Композиционная керамика на основе слоистого кобальтита кальция, модифицированного висмутом	220
<i>Осипенко М. А. , Курило И. И. , Цыганов А. Р.</i> Коррозионное поведение сверхлегких сплавов магния AZ31-xLi в ингибированных молибдатами растворах NaCl	223
<i>Журавлева Я. Ю. , Клындюк А. И.</i> Кристаллическая структура, микроструктура и тепловое расширение твердых растворов $\text{Nd}_{1-x}\text{BaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1-x}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$	226
<i>Богомазова Н.В., Шуваева К. Д.</i> Технологические особенности химического наслаивания пленок CdS на стеклопластины	230
<i>Матыс В. Г., Станишевский Г. С.</i> Получение и свойства черных конверсионных покрытий из молибдатных растворов на гальванически оцинкованной стали	234

<i>Матыс В. Г., Бобрович О. Г., Поплавский В.В.</i> Влияние ионно-ассистируемого осаждения церия на электрохимическое поведение алюминия и титана в растворе хлорида натрия	237
<i>Тарасевич А. В., Жарский И. М., Матыс В. Г., Орлицкий В. В.</i> Получение бесхромовых конверсионных покрытий на оцинкованной стали из цирконийсодержащих растворов, модифицированных продуктами кислотного гидролиза тетраэтоксисилана и тетрафторборатом аммония...	241
<i>Жилинский В.В., Остапук О.О., Яскельчик В.В.</i> Формирование покрытий на основе железа с ультрадисперсными алмазами для повышения прочности дереворежущих инструментов	244
<i>Amir Waseem, Zhyllinski V.V.</i> The new materials based on mxenes for developing of sustainable energy.....	248
<i>Волков А.И.</i> Пути совершенствования химического образования в условиях информатизации общества	251
<i>Черник И.А., Курило И.И., Черник А.А.,</i> Влияние параметров импульсного электролиза на свойства покрытий сплавом никель–железо.....	256
<i>Красуцкая Н.С., Клындюк А.И.</i> Определение содержания натрия в слоистом кобальтите натрия $\text{Na}_{0.55}\text{CoO}_2$ различными методами	258
<i>Курило И.И., Дяденко М.В., Поспелов А.В., Богдан Е.О., Глинский А.С.</i> Композиционное покрытие на основе модифицированного биостеклами полилактида на фосфатированных сплавах магния	260
<i>Цыганов А.Р., Панасюгин А.С., Курило И.И., Машерова Н.П., Павловский Н.Д.</i> Влияние кислотной активации на кинетику сорбции паров ацетона, этилацетата и изопропанола на природном и модифицированном шунгите.....	264
<i>Цыганов А.Р., Панасюгин А.С., Курило И.И., Машерова Н.П., Павловский Н.Д.</i> Исследование коррозионной стойкости (кислотостойкости) нержавеющей сталей и сплавов	267
<i>Коваленко Н. А., Сычик К.А., Курпиченко М.Ю.</i> Компонентный состав и антимикробная активность эфирного масла <i>SOLIDAGO CANADENSIS</i>	272
<i>Юхно Е. К., Шевченко С. В.</i> Фотолюминесцентные свойства твердых растворов на основе индата лантана, легированного ионами празеодима, самария и тербия	276
<i>Шевченко С.В., Чижова Е.А., Морозов М. В., Степаньков Е. А., Селейкович А. Э.</i> Влияние дефицита катионов неодима и бария на структуру и свойства $\text{NdBaFeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$	279
<i>Ашуйко В.А., Малашонок И.Е., Гвоздева Н.А., Радченко С.Л.</i> Синтез керамических пигментов на основе гидроксипатита для антикоррозионных покрытий	283
<i>Дониёров С.А., Хандамов Д.А., Бекмирзаев А.Ш., Хонкулов Ш.Б.</i> Исследование адсорбции ионов хрома на природных и активированных бентонитах	287
<i>Белов М. Д., Сухарев А.О., Граури С.А., Афанасьева А.В.</i> Исследование эффективности электролитноплазменной обработки для полировки различных сплавов	290
<i>Khandamova D.K., Nurullaev Sh.P., Alixonova Z.S., Babaev O.O.</i> Isothermal models of adsorption of iron ions by organobentonites in	294

<i>Ченцова Е. В., Кайро П. В.</i> Применение нестационарных режимов электролиза при осаждении сплава железо-кобальт	299
<i>Никитин К.С., Мальцева О.В., Мамардашвили Н.Ж., Смирнова А.И.</i>	
<i>Усольцева Н.В.</i> Процесс формирования плавающего слоя дифенилпорфирина	302
<i>Гладких С.Н.</i> Очистка гальванических стоков ремонтных предприятий электрокоагуляционным методом	306
<i>Извекова А.А., Квиткова Е.Ю., Гуцин А.А.</i> Очистка водных растворов от хлорамфеникола в диэлектрическом барьерном разряде	309
<i>Черник Е.О., Курило И.И., Черник А.А.</i> Осаждение никелевых покрытий на корпуса стоматологического инструмента в условиях импульсного тока	312
<i>В.В. Семёнов</i> Роль катионов марганца в процессах заряда-разряда водных цинк-ионных аккумуляторов	314

Подсекция «АВТОМАТИЧЕСКИЕ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

<i>Дубиковская Е.В., Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Арпентий Д.О.</i>	
Использование систем разомкнутых систем управления	318
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Подтероб Н.И., Новицкая Д.О.</i> Синтез MODEL PREDICTIVE CONTROL	321
<i>Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Петручук П.Д., Кустов Г.А.</i> Контроль герметичности запорной арматуры	324
<i>Гринюк Д.А., Бакаленко В.И., Былина М.Д., Захвей И.А.</i> Измерение проводимости почвы	327
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Бажко М.Л., Старовойтов М.С.</i>	
Сравнение результатов разных вариантов компенсаторов	330
<i>Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Станкевич Я.П., Ежиков Д.Ю.</i>	
Виртуальные контроллеры автоматизации	333
<i>Королёв А.А., Фокин Т.П.</i> Использование технологий BIG DATA и SMART DATA в автоматизации	336
<i>Бакаленко В.И., Дейнека Т.А., Шпаковский Г.В., Бровенко А.Л.</i>	
Экспериментальные исследования емкостных сенсоров относительной влажности воздуха в диапазоне 75 – 100%RH	339
<i>Лялько А.А.</i> Архитектура основных типов нечётких систем управления ...	343
<i>Лялько А.А.</i> Классификация нечётких систем управления	347
<i>Анкуда М.А., Олиферович Н.М., Анкуда М.К., Оробей И.О., Карпович Д.С.</i>	
Анализ процессов генерации шумов в пленочном полупроводниковом сенсоре	350
<i>Анкуда М.А., Олиферович Н.М., Анкуда М.К., Оробей И.О., Карпович Д.С.</i>	
Математическое моделирование процессов в пленочном полупроводниковом сенсоре в условиях внешнего электромагнитного воздействия	353
<i>Анкуда М.А., Олиферович Н.М., Анкуда М.К., Оробей И.О., Карпович Д.С.</i>	
Фильтрация сигналов с выхода полупроводниковых пленочных сенсоров	357
<i>Анкуда М.А., Оробей И.О., Сарока В.В.</i> Адаптивный измеритель концентрации газовых смесей	361
<i>Анкуда М.А., Оробей И.О., Сарока В.В.</i> Параметрический автодинный детектор для качественного анализа свойств полупроводниковых пленок .	365

<i>Кобринец В.П., Барашко О.Г. Анализ эффективности применения электроприводов промышленных механизмов</i>	368
<i>Кобринец В.П., Карпович Д.С. Основные методы оптимального управления процессом ректификации нефти</i>	370
<i>Кобринец В.П., Карпович Д. С. Разработка динамической модели процесса первичной переработки нефти</i>	374
<i>Кобринец В.П., Барашко О.Г. Статическая оптимизация процесса сушки в барабанной сушилке</i>	378
<i>Александров О.И., Островская Д.В., Жуковская Т.Е. Программный комплекс для обработки статистических данных по режимам белорусской энергосистемы</i>	381
<i>Александров О.И., Кадыко А.А., Жуковская Т.Е. Рациональное распределение активной нагрузки для сезонных режимов в высоковольтной сети Белорусской энергосистемы</i>	385
<i>Шумский А.Н., Каптюг Е.В. Тихомиров С.Г. Увеличение автономности беспилотных летательных аппаратов за счет применения нейронных сетей</i>	389
<i>Кузьмицкий И.Ф., Карпович Д.С., Джумаев О.А. The development of some methods by control of objects with delay</i>	391
<i>Хаустов И.А., Юсупбеков А.Н., Карпович Д.С., Фокин Т.П. Сравнительный анализ аппроксимации звена $(1-W(P))$ реально дифференцирующим звеном и апериодическим звеном второго порядка ..</i>	392
<i>Шиман Д.В., Карпович С.И., Кадиров Ё.Б. Использование нейронных сетей при организации учебного процесса с иностранными студентами ...</i>	394
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Подтероб Н.И., Буракова П.А. Регулирование параметров путем управления частотой насоса</i>	395
<i>Исаченков В.С., Леонов Е.А., Арико С.Е., Гиль В.И., Лагун А.И., Клоков Д.В. Карпович С.С. Особенности имитационного моделирования системы «КАБИНА – СИДЕНЬЕ – ОПЕРАТОР» колесных трелевочных машин</i>	398
<i>Мороз Р.Р. Качество электрической энергии</i>	402
<i>Багдыев А.А., Чарыев А.Б., Алламырадова Г.Р. Историческое развитие и современные тенденции управления роботами-манипуляторами</i>	404
<i>Чарыев А.Б., Шайымов С.С., Аннабердиев И.А. Динамическое управление программным движением промышленных роботов-манипуляторов ...</i>	406
<i>Романцов А.А., Лавырев С.В., Соколов М.В. Автоматизация радиационного контроля сварных соединений, достижения, проблемы и преимущества</i>	410
<i>Байлиев Б.Н., Шайымов С.С., Чарыев А.Б. Современные тенденции управления роботами-манипуляторами</i>	412
<i>Ковалёв Д.А. Применение имитационного моделирования для предиктивной аналитики состояния поверхностей нагрева содорегенерационного котлоагрегата</i>	414
<i>Шайымов С.С. Автоматизированные и информационные системы в производстве с использованием манипуляторов</i>	417
<i>Шайымов С.С., Чарыев А.Б. Типы манипуляторов для различных производственных задач</i>	419
<i>Барашко О.Г., Овсянников А.В., Кобринец В.П. Базовые и локальные компоненты пакета Sl 4.7 для SCADA-систем</i>	421
<i>Овсянников А.В., Барашко О.Г., Кобринец В.П. Анализ амплитудных</i>	423

фильтров для распределенных систем	
<i>Барашко О.Г., Кобринец, В.П., Овсянников А.В.</i> Настройка модуля «Редактор каналов» для пакета SI 4.7	425
<i>Овсянников А.В., Барашко О.Г.</i> Модификации амплитудных фильтров дискретных состояний	428

Подсекция «ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ И БИОЭКОЛОГИЯ»

<i>Янута Ю.Г., Шкиндерова А.А.</i> Изучение регенерации адсорбента очистки биогаза с использованием термического анализа	430
<i>Янута Ю.Г., Дудникова Е.Л.</i> Исследование размера и заряда частиц гуматных препаратов как фактор их седиментационной устойчивости	434
<i>Янута Ю.Г.</i> Применение гельхроматографии для изучения агрегативной устойчивости фульвоподобных соединений с катионами кальция	437
<i>Казимирская Е.Н., Лихачева А.В.</i> Сбор нефтепродуктов с поверхности воды композиционными магнитными сорбентами	440
<i>Дорошко Е.Ю.</i> Исследование потенциала донных отложений для рекультивации отработанных полигонов твердых коммунальных отходов	443
<i>Мытько Д.В., Шибика Л.А.</i> Сравнительная характеристика целлюлозосодержащих отходов как сорбционных материалов	446
<i>Кичкайло О.В., Довыденко М.С., Чулец А.И.</i> Исследование зернистой фильтрующей загрузки в процессах водоподготовки	449
<i>Кичкайло О.В., Пожарская А.В., Татаринев Е.М.</i> Сорбенты на основе глауконитсодержащей породы для очистки сточных вод	452
<i>Залыгина О.С.</i> Исследование вымывания ионов тяжелых металлов из керамического кирпича, полученного с использованием отходов гальванического производства	455
<i>Дубина А.В.</i> Сравнение окислительных способов очистки сточных вод от формальдегида	458
<i>Давыдова С.Г., Притула О.Д.</i> Некоторые аспекты деятельности атомных электростанций, на примере Калининской и Ленинградской АЭС	461
<i>Босак В.М., Сачыўка Т.У., Дамнянкова А.У.</i> Агразкалагічныя аспекты выкарыстання арганічных угнаенняў	464
<i>Гладких С.Н.</i> О состоянии природной и питьевой воды Великого Новгорода .	467
<i>Штепа В.Н., Бобрикович А.В., Бобрикович Ю.В.</i> Нейросетевой модуль оценки и прогноза параметров очистки сточных вод	470
<i>Макеева Е.Н., Морозова О.Ю.</i> Оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании печного бытового топлива	473
<i>Боровик А.А., Протасов С.К.</i> Использование пуха рогоза как сорбента при очистке воды	476
<i>Аюбова И.Х., Юнусов О.К.</i> Особенности определения квалификационных требований специалистов по промышленной экологии	480
<i>Демиденко Е.Н., Казимирская Е.Н., Лихачева А.В.</i> Выбор варианта получения магнитных сорбентов на основе анализа жизненного цикла	483
<i>Ковалева К.Д., Лихачева А.В.</i> Фотокатализаторы для очистки природных и сточных вод	486
<i>Бочко Н.А., Лихачева А.В.</i> Контроль качества подземных вод Минской агломерации	489
<i>Зотова В.Д., Булич Д.Д., Лихачева А.В.</i> Перспективы рекультивации месторождений полезных ископаемых	492

<i>Дашкевич А.Н., Лихачева А.В.</i> Технология биокomпостирования многокомпонентных производственных отходов	496
<i>Янута Ю.Г., Шелоник М.А., Янута Г.Г.</i> Отработанный субстрат выращивания шампиньонов как перспективное сырье для вермикомпостирования	499
<i>Шибeka Л.А., Казачихина А.А.</i> Сорбционная очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов в динамических условиях	503
<i>Шибeka Л.А., Доминиковская И.В.</i> Переработка отходов производства сахара в компост	506
<i>Залыгина О.С., Завадский К.В., Филиппук М.А.</i> Рециклинг сточных вод керамических предприятий	509
<i>Клинцова А.К., Гумеров Т.Ю.</i> Задачи инженерии окружающей среды	513
<i>Курбатов А.Ю., Перевощикова П.Ю.</i> Оценка эффективности деструкции двухатомного фенола	516
<i>Сайфутдинова Р.Д., Степанова С.В.</i> Пути снижения токсичности нефтесодержащих вод при применении отходов сельского хозяйства	520
<i>Кенджаев У.К.</i> Изучение водных ресурсов в Таджикистане	523
<i>Дворцевая В.В., Левченко Л.Г.</i> Применение и обеспечение радиационной защиты промышленных источников ионизирующего излучения в Донецкой Народной Республике	526
<i>Иванцова Н.А., Шлыкова А.Ю., Заричный А.И.</i> Оценка эффективности очистки сернисто-щелочных сточных вод с помощью озонирования и электроокисления	529
<i>Извекова А.А., Квиткова Е.Ю., Гуцин А.А.</i> Очистка водных растворов от хлорамфеникола в диэлектрическом барьерном разряде	532
<i>Шагиахметова А.Р., Гумеров Т.Ю.</i> Современные тенденции валоризации загрязняющих веществ	535
<i>Яковлев И.В., Горелкина А.К.</i> Буферность почвы и её поддержание с использованием стерня после сжигания	539
<i>Сахно Е.А., Иванцова Н.А.</i> Сравнительная оценка эффективности очистки воды от нитрофурала с помощью озонирования и электроокисления	542
<i>Ветрова М.А., Гуина Е.М.</i> Каталитическая деструкция нитрофурала под воздействием импульсной ксеноновой лампы	546
<i>Ветрова М.А., Перевощикова П.Ю.</i> Анализ эффективности окисления резорцина методом озонирования	550
<i>Ефимова Е.А., Гумеров Т.Ю.</i> Экологический катализ	553
<i>Беспалько Н.Е., Жернякова А.А., Ташикинов А.В.</i> Биоиндикаторы состояния окружающей среды для промышленных предприятий химического производства лакокрасочных изделий	558
<i>Беспалько Н.Е., Жернякова А.А., Ташикинов А.В.</i> Анализ индексов растительности, как метод дистанционного зондирования для измерения общей потери продуктивности наземных экосистем и биоразнообразия вследствие лесных пожаров	562
<i>Климош Ю.А., Татур А.И., Бубич А.С., Герасимчук А.А.</i> Основные направления использования базальтов, сапонитсодержащих туфов и глауконитсодержащих пород для получения материалов и изделий различного назначения	567
<i>Климош Ю.А., Шиманская А.Н., Бубич А.С., Герасимчук А.А.</i> Стекла, стекловидные покрытия и керамические облицовочные материалы с использованием базальтов и туфов месторождения Новодворское	573

<i>Зайнуллин А.М., Гилязова Й.А.</i> Разработка программных мероприятий по снижению риска и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций на автотранспортном предприятии	577
<i>Романова С.М., Фатыхова Л.А.</i> Утилизация твердых промышленных отходов специализированных химических предприятий с целью получения гражданской продукции	582
<i>Марицун В.Н., Войтов И.В.</i> Современные технологии обработки осадков очистных сооружений канализации и обращения с ними	586
<i>Марицун В.Н.</i> Перспективы использования крытых лагун для стабилизации осадков очистных сооружений и отходов животноводческих комплексов	590
<i>Макеева Е. Н., Морозова О. Ю.</i> Оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании печного бытового топлива	593
<i>Паньков В.В., Тимоненкова А.С., Асадчий М.В.</i> Темплатный синтез пористого оксида алюминия с использованием металлоорганического соединения	596
<i>Рахимкулов Ш.Р. , Самадий М.А.</i> Физико-химические свойства и способы получения оксида цинка	599

Научное издание

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА

**Материалы докладов 89-й научно-технической
конференции профессорско-преподавательского
состава, научных сотрудников и аспирантов
(с международным участием)**

Электронный ресурс

В авторской редакции

Компьютерная верстка:

*Н.А. Гвоздева, Е.В. Лукаш, Е.Г. Федарович, С.Л. Радченко, Т.П. Фокин,
Е.Н. Казимирская, С.В. Бушева, Е.О. Черник*

Усл. печ. л. 35,63. Уч.-изд. л. 36,78.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.