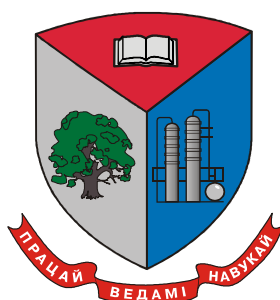


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет»  
Минское областное отделение РГОО  
«Белорусское общество «ЗНАНИЕ»  
Международное общество ученых технического образования



**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХОЛОГИЯ И ТЕХНИКА**  
**Тезисы докладов 82-й научно-технической конференции**  
**профессорско-преподавательского состава,**  
**научных сотрудников и аспирантов**  
**(с международным участием)**

**1–14 февраля 2018 года**

Минск 2018

УДК 66+62]:005.745(0.034)

ББК 35я73

Х 46

**Химическая технология и техника:** тезисы 82-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1-14 февраля 2018 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2018. – 162 с.

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, не- традиционные 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:

д-р техн. наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики И. А. Левицкий

д-р хим. наук, профессор кафедры физической и коллоидной химии Л.А. Башкиров

д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе О. Б. Дормешкин

Главный редактор

ректор, профессор И.В. Войтов

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Терещенко И.М., Дормешкин О.Б., Жих Б.П., Кравчук А.П.</i> Проблемы и перспективы использования кремнегеля в многотоннажных производствах.....	11
<i>Бобкова Н.М., Трусова Е.Е.</i> Составы стекол для получения полых стеклянных микросфер.....	13
<i>Булай Т.В., Кузьменков М.И., Шалухо Н.М., Кузьменков Д.М., Сушкевич А.В.</i> Перспективы получения и применения серобетона на основе кека сернокислотного производства.....	14
<i>Минаковский А.Ф., Гриб К.В., Баранов П.И.</i> Получение смешанных бесхлорных комплексных удобрений на основе сульфата калия Нивенского месторождения методом компактирования.....	15
<i>Гаврилюк А.Н., Дормешкин О.Б., Титок М.В., Канберг Д.Д.</i> Особенности получения и свойства сложно-смешанных удобрений на основе сульфата калия.....	16
<i>Павлюкевич Ю.Г., Гундилович Н.Н.</i> Многослойные керамические материалы с микрофильтрующим слоем из структурированных тонкодисперсных керамических порошков.....	18
<i>Комаров М.А., Кузьменков М.И., Короб Н.Г., Кузьменков Д.М., Сакович А.А.</i> Структурно-управляемый синтез дигидрата сульфата кальция.....	19
<i>Левицкий И.А., Шиманская А.Н., Ериш Е.А.</i> Металлизированные глазурные покрытия и особенности формирования их структуры.....	20
<i>Павлюкевич Ю.Г., Ларионов П.С.</i> Применение низкотемпературной плазмы в процессах синтеза и обработки силикатных материалов.....	21
<i>Головач Р.В., Дятлова Е.М., Сергиевич О.А.</i> Технологические особенности получения керамических пленочных покрытий на пористых структурах.....	23
<i>Левицкий И.А.</i> Минералы и минералоподобные вещества в организме человека.....	24
<i>Дяденко М.В., Папко Л.Ф., Кузьмин А.В., Поротникова Н.М.</i> Стеклокристаллические материалы для твердооксидных топливных элементов.....	25
<i>Ещенко Л.С., Мечай А.А., Попова М.В., Бородина К.В.</i> Низкотемпературный синтез железоксидных пигментных материалов для окрашивания силикатного кирпича.....	27
<i>Левицкий И.А., Хоружик О.Н.</i> Формирование структуры плотнос-пекшихся керамических материалов на основе полиминерального глинистого сырья.....	29

<i>Льщик С.А., Кузьменков М.И., Шалухо Н.М., Короб Н.Г.</i> Огнеупорные изделия из техногенного сырья на фосфатной связке.....	30
<i>Жих Б.П., Терещенко И.М., Кравчук А.П.</i> Особенности синтеза силикатов щелочных металлов с повышенным модулем на основе кремнегеля.....	31
<i>Пищ И.В., Лазько Г.В.</i> Разработка керамических масс для объемно окрашенного кирпича.....	32
<i>Левицкий И.А., Баравскис Ю.И.</i> Прозрачные полуфриттованные глазури для керамогранита.....	33
<i>Минаковский А.Ф., Шатило В.И., Дашко Н.С., Карчевская В.Г.</i> Технология серосодержащих жидких комплексных удобрений.....	34
<i>Румынская Е.И., Кузьменков М.И., Короб Н.Г., Сушкевич А.В.</i> Огнезащитное покрытие на основе фосфатов аммония.....	35
<i>Левицкий И.А., Галай А.Д.</i> Декоративные глазури кракле для майоликовых изделий.....	36
<i>Здановіч Н.І.</i> Посуд для смажання і пражання страваў у 12-19 стст. у традыцыйнай культуры беларусі (паводле археалагічных і пісьмовых крыніц).....	37
<i>Мисюля Д. И.</i> Анализ потерь давления в выхлопной трубе циклона....	39
<i>Мисюля Д. И.</i> Оптимизация раскручивающего устройства для снижения потерь давления в выхлопной трубе циклона.....	40
<i>Вайтехович П. Е., Боровский Д. Н.</i> Влияние способа обкатки помольных барабанов планетарной мельнице на разрушающую способность мелющих тел.....	41
<i>Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С.</i> Влияние конструктивных и режимных параметров ударно-центробежной мельницы на износ рабочей поверхности ротора.....	42
<i>Вайтехович П. Е.</i> Самофутеровка измельчающих агрегатов.....	43
<i>Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С.</i> Экспериментальное исследование и обобщение данных интенсифицированного свободноконвективного теплообмена однорядных пучков ребристых труб.....	44
<i>Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С., Фарафонов В. Н., Дударев В. В.</i> Теплоаэродинамические характеристики шахматных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами группы компании «ЦНО-ХИММАШ».....	45
<i>Левданский И. А., Левданский Э. И.</i> Срыв влаги с поверхности частиц вихревым потоком воздуха в перфорированном цилиндре.....	47
<i>Дударев В. В., Фарафонов В. Н.</i> Вычисление распределения плотности тепловых потоков в цилиндрическом слое внешнего загрязнения оребренной трубы.....	48

<i>Андрижиевский А. А., Матарас Н. Н., Трифонов А. Г., Кулик Л. С.</i>	
Анализ динамической устойчивости пленочной конденсации в кон- туре охлаждения системы пассивного отвода тепла АЭС.....	49
<i>Хвесько Г. М., Вайтехович П. Е.</i> Мощность привода заглаживающей машины с дисковым планетарным рабочим органом в установившем- ся движении.....	51
<i>Здитовецкая С. В., Володин В. И.</i> Использование теплового насоса в системе отопления теплый пол.....	52
<i>Володин В. И., Костеневич А. Е.</i> Тепловое проектирование испарите- лей аэротермальных тепловых насосов.....	53
<i>Павлечко В. Н.</i> Параметры осевой турбины при тангенциальном вво- де потока рабочей среды .....	55
<i>Павлечко В. Н., Герасимчик С. А.</i> Определение коэффициента сопро- тивления радиальных вентиляторов с одинаковыми углами наклона лопастей.....	56
<i>Францкевич В. С., Павлечко В. Н., Ильяшенко Е. О.</i> Особенности ис- пользования технического кислорода при сжигании газообразного топлива.....	57
<i>Францкевич В. С.</i> Анализ применения вертикальных валковых мель- ниц в зарубежной и отечественной промышленности.....	58
<i>Кобринец В. П., Коровкина Н. П., Пустовалова Н. Н.</i> Энергосбереже- ние на промышленных предприятиях на основе вентиляльно- индукторного привода технологического оборудования.....	59
<i>Петров О. А.</i> Исследование аппаратов кавитационного типа.....	60
<i>Опимах Е. В., Левданский А. Э.</i> Схема классификации существующих процессов флотации и их аппаратурного оформления.....	61
<i>Опимах Е. В., Левданский А. Э.</i> Методика инженерного расчета пневма- тического аэратора в виде плоской спирали.....	62
<i>Клындюк А. И., Скриганова А. В., Минаков Г. И., Чижова Е. А.</i> Ди- электрические свойства керамики $\text{Bi}_{3.85}\text{Ln}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (Ln – Pr, Nd).....	63
<i>Клындюк А. И., Красуцкая Н. С., Слижеская М. Э.</i> Свойства двой- ных оксидов висмута–кальция $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ , $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$ и висмута–кобальта $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$ как предшественников при синтезе термоэлектрической керамики на основе слоистых кобальтитов висмута–кальция.....	65
<i>Грищенко Л.С., Иванова Н. П., Матыс В.Г., Ашуйко В.А.</i> Влияние ин- гибирующих добавок на скорость коррозии горячеоцинкованной ста- ли .....	67
<i>Кешин А.В., Черник А.А.</i> Исследование коррозионного поведения модифицированных анодно-оксидных покрытий, содержащих соеди- нения переходных металлов.....	69

<i>Черник А.А., Пянко А.В.</i> Электрохимическое нанесение сплава олово-никель .....	71
<i>Акулич Н.Е., Мурашко К.Ю., Иванова Н.П., Жарский И.М.</i> Влияние молибденовой пассивации на микроструктуру и коррозионное сопротивление гальванических цинковых покрытий.....	72
<i>Богомазова Н.В., Галковский Т. А., Комаренко А.Н., Мурашкевич А.Н.</i> Получение фоточувствительных сульфидных гетероструктур на планарных подложках.....	74
<i>Курило И. И. , Радченко С. Л., Жарский И. М. , Касач А. А.</i> Влияние сонохимической обработки на электроосаждение сплава медь–олово...	75
<i>Алексеенко И.А., Башкиров Л.А., Юхно Е.К., Кандидатова И.Н., Першукевич П.П.</i> спектры возбуждения и фотолюминесценции твердых растворов на основе $\text{LaInO}_3$ , легированного ионами $\text{Eu}^{3+}$ , $\text{Sm}^{3+}$ , $\text{Sb}^{3+}$ ...	76
<i>Егорова Ю. А., Сарнова А. В., Кубрак П. Б. , Жарский И. М.</i> Исследование поведения поверхностно-активных веществ анионного и катионного типов при анодной поляризации.....	77
<i>Печенова Г.Г., Саскевич В.В., Великанова И.А., Дудчик Г. П.</i> Синтез и свойства твердых растворов мультиферроиков на основе феррита висмута $\text{BiFeO}_3$ .....	78
<i>Матыс В.Г., Ашуйко В.А., Новикова Л.Н., Прокофьева Н.О., Шило М.В.</i> Ванадатно-молибдатная пассивация гальванически оцинкованной стали.....	79
<i>Письменская А.С., Черник А.А., Кошевар В.Д.</i> Электрохимическое анодирование Al для создания гидрофобной поверхности.....	80
<i>Алисиенок О.А., Мурашкевич А.Н., Жарский И.М., Шидловская В.Г., Новицкая М.С.</i> Функциональные наноматериалы, полученные с использованием гидрозоля диоксида титана.....	82
<i>Непомнящих Ю.В., Пучков С.В.</i> Расчет энергий активации реакций радикала $\text{HO}\cdot$ с СН-связями 2-бутанола.....	84
<i>Карпович Д.С., Хейфец М.Л., Тихомиров С.Г., Карпович С.С.</i> Учет эффекта глубокой отрицательной связи для тепловых объектов.....	86
<i>Овсянников А. В. , Барашко О. Г.</i> Сглаженная гистограммная оценка плотности распределения на основе нечеткой принадлежности измерений интервалу группирования.....	87
<i>Мозоль Т.А., Карпович Д.С.</i> Описание распределенных тепловых объектов.....	88
<i>Тихомиров С.Г., Пятаков Ю. В., Маслов А.А., Холева Е.Э.</i> Разработка информационной модели процесса вулканизации .....	89
<i>Тихомиров С. Г., Подвальный С. Л., Карманов А. В.</i> Моделирование кинетики радиационной деструкции полимеров.....	91

<i>Суханова Н. В., Кожевников Ю. Е., Дугина К. В.</i> Метод определения коэффициентов модели и оптимального значения отбора биомассы...	92
<i>Sleiman M., Karpovich D.</i> Modeling the continuous variable transmission system.....	94
<i>Анкуда М. А., Жарский С. Е.</i> Замкнутая система позиционирования приводов рабочих механизмов 3D-принтера.....	95
<i>Анкуда М. А., Жарский С. Е.</i> Математическая модель гибридного шагового двигателя для привода 3D-принтера.....	96
<i>Анкуда М. А., Жарский С. Е.</i> Моделирование в Simulink гибридного шагового двигателя.....	97
<i>Карпович Д. С., Оробей И. О., Сарока В. В., А.Р. Челябинов</i> Моделирование системы автоматического управления приводами гиросtabilизированного опорно-поворотного устройства.....	98
<i>Карпович Д. С., Подобед М. Ю., Сарока В. В., Пеховский А. В.</i> Использование оборудования ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» в учебном процессе и на производстве.....	99
<i>Овцов С. А., Сарока В. В.</i> Возможность использования FOC-управления для повышения производительности робота-манипулятора гальванических линий.....	100
<i>Карпович Д.С., Подобед М.Ю.</i> Блок нечеткой селекции сигналов обратных связей.....	101
<i>Карпович Д.С., Подобед М.Ю.</i> Математическое моделирование системы кондиционирования воздуха.....	102
<i>Карпович Д.С., Подобед М.Ю.</i> Предпосылки к селекции сигналов обратных связей по нескольким каналам .....	103
<i>Карпович Д.С., Подобед М.Ю.</i> Системы автоматического управления температурным режимом в помещениях больших объемов.....	104
<i>Анкуда М. А., Оробей И. О.</i> ЯМР-магнитометр для измерения малых полей методом прецессии.....	105
<i>Гринюк Д. А., Сухорукова И.Г., Олиферович Н. М.</i> О настройке ПИД-регулятора с помощью интегральных критериев.....	107
<i>Гринюк Д. А., Сухорукова И.Г., Олиферович Н. М.</i> Сравнительная оценка робастности цифровых регуляторов.....	109
<i>Оробей И. О., Лысов Е. А., Анкуда М. А., Олиферович Н. М., Кузьмицкий Д. В.</i> Адаптивный контур с изменением параметров настройки по изменяемому критерию.....	110
<i>Гринюк Д. А., Жарский С. Е., Оробей И.О., Павлюкевич Д. Ю.</i> Спектральные характеристики колебаний ленточных конвейеров.....	111
<i>Гринюк Д. А., Жарский С. Е., Оробей И.О., Бирюкова Н.Н.</i> Решение задач обнаружения, сопровождения и построения их траекторий.....	112

<i>Олиферович Н.М., Гринюк Д.А., Оробей И.О.</i> Экспериментальное исследование первичного преобразователя впитывания .....	114
<i>Каишкан М. А. , Гринюк Д. А.</i> Исследование робастных свойств систем управления теплообменниками.....	116
<i>Жарский С. Е. , Гринюк Д. А. , Анкуда М. А.</i> Самоподстраивающийся регулятор расхода проливной установки дизельного топлива.....	117
<i>Карпович Д.С., Михайлов В.Б., Латушкина С.Д., Dainius Udris</i> Обработка распределенных тепловых полей объектов, полученных с помощью тепловизоров.....	119
<i>Шумский А.Н.</i> Настройка параметров закона управления для стабилизации бокового отклонения при полете по маршруту беспилотного летательного аппарата.....	120
<i>Лихавицкий В. В. , Романовский В. И.</i> Математическое описание процесса растворения озона по высоте столба жидкости.....	121
<i>Михайлов В.Б., Сидорчик Д.Е.</i> Интеллектуальный индикатор газовых выбросов промышленных предприятий, адаптированный с микропроцессорной АСУ ТП.....	122
<i>Сидорчик Д.Е., Стоцкий В.А.</i> Система технического зрения на основе Нейросети.....	123
<i>Широков А.В., Карпович Д.С.</i> Конструктивная база и схемные решения современных DC-DC преобразователей .....	124
<i>Кунцевич Н.А., Карпович Д.С.</i> Формирование задачи управления тиснильно-склеивающей линией .....	125
<i>Ивахов П. П., Хаустов И. А.</i> Оценка качества готовой продукции на примере процесса дезодарации подсолнечного масла с применением нейронных сетей.....	127
<i>Суханова Н. В., Кожевников Ю. Е., Дугина К. В.</i> Метод определения коэффициентов модели и оптимального значения отбора биомассы... ..	128
<i>Барашко О.Г., Овсянников А.В.</i> Реализация прогнозирования спроса в ERP-системе R/3.....	130
<i>Александров О.И., Кузьмицкий И.Ф., Лялько А.А.</i> Вопросы взаимодействия смежных энергосистем с учетом межсистемных связей.....	131
<i>Брель Н.К. , Барашко О.Г.</i> Учет основных переменных при исследовании динамических свойств процесса размола волокнистой массы... ..	134
<i>Лялько А.А.</i> Численные методы решения задач оптимизации в системе MATLAB.....	135
<i>Демидов О.К. , Барашко О.Г.</i> Системы автоматического управления основных схем шахтной вентиляции.....	136
<i>Клютко М. В. , Кобринец В. П.</i> Особенности применения системы технического зрения в управлении электромеханическими системами.....	137



<i>Полосин А. Н., Ворожбянов К. А.</i> WEB-Приложение для исследования и управления качеством полимерных упаковок, изготавливаемых методом термоформования.....	138
<i>Близнюк Я.И., Корвин Д., Карпович С.С.</i> Автоматизация обработки информации для создания аудиокниг.....	140
<i>Марцуль В.Н., Дубовик О.С., Иванович В.В.</i> Сравнение вариантов использования энергетического потенциала осадков очистных сооружений и канализации.....	141
<i>Марцуль В.Н., Сапон Е.Г.</i> Определение сорбционной ёмкости и гидравлических характеристик сорбента SynergySorb ПС-1000....	142
<i>Шепелева Н.И.</i> Создание фитомелиоративных систем короткого цикла ротации на основе неэксплуатируемых иловых площадок..	143
<i>Козловская И.Ю., Козловский В.Ю.</i> Подготовка методик количественного химического анализа к метрологической экспертизе и аттестации.....	144
<i>Марцуль В.Н., Павловский Н.В.</i> Определение биогазового потенциала осадков очистных сооружений канализации.....	145
<i>Янута Ю.Г., Абрамец А.М.</i> Подвижность активного цезия в зольных отходах от сжигания торфа.....	146
<i>Москальчук Л.Н.</i> Наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты радионуклидов на основе глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий».....	147
<i>Леонтьева Т.Г., Москальчук Л.Н.</i> Оценка эффективности использования глинисто-солевых шламов в качестве сорбентов радионуклидов.....	148
<i>Дубовик О.С., Маркевич Р.М.</i> Условия миграции соединений фосфора в иловой смеси.....	149
<i>Ковчур С.Г., Потоцкий В.Н., Ковчур А.С., Гречаников А.В.</i> Изготовление тротуарной плитки с добавками отходов ХВО.....	150
<i>Гречаников А.В., Ковчур А.С., Ковчур С.Г., Тимонов И.А.</i> Исследование влияние внесения отходов ХВО на свойства тротуарной плитки.....	151
<i>Шелег В.К., Ковчур А.С., Ковчур С.Г., Потоцкий В.Н.</i> Исследование методов и определение оптимальных параметров извлечения никеля из отходов гальванического производства.....	153
<i>Залыгина О.С., Чепрасова В.И., Шаметько К.Ю.</i> Влияние примесей железа на колористические характеристики пигментов, полученных из отработанных электролитов никелирования.....	154

<i>Шибека Л.А., Команяк В.А.</i> Сравнительный анализ использования различных материалов в процессах очистки сточных вод.....	155
<i>Лихачева А.В., Шавко Д.В., Рылко Н.Н.</i> Сравнительный анализ способов переработки отработанных растворов травления черных металлов.....	156
<i>Лихачева А.В., Рылко Н.Н., Шавко Д.В.</i> Переработка железосодержащих отходов ОАО «Речицкий метизный завод».....	157
<i>Кравченко М.Л., Лихачева А.В.</i> Сравнительный анализ способов использования отработанных электролитов гальванического цинкования.....	158
<i>Кравченко М.Л., Лихачева А.В.</i> Влияние блескообразователей на осаждение ионов цинка из отработанных электролитов гальванического цинкования.....	159
<i>Сулейко Т.Л., Семёнова Е.И.</i> Новый взгляд на процесс очистки сточных вод предприятий молочной промышленности .....	160

УДК 661.683.3+666.189.3

И.М. Терещенко, доц., канд. техн. наук;  
О.Б. Дормешкин, проф., д-р техн. наук; Б.П. Жих, асп.;  
А.П. Кравчук, ст. преп., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНЕГЕЛЯ В МНОГОТОННАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ**

В процессе получения минеральных удобрений и фтористых солей на ОАО «Гомельский химический завод» и АО «Апатит», образуется значительное количество отхода производства – аморфного кремнезема (кремнегеля) с влажностью 60–65 %. Только на российских предприятиях ежемесячно в отвалы направляется свыше 45,0 тыс. тонн кремнегеля, аналогичные производства действуют в Республике Беларусь, Прибалтике и Украине. Таким образом, не используется ценный сырьевой ресурс и ухудшается состояние окружающей среды в результате накопления отвалов.

Однако до сих пор не создана эффективная промышленная технология переработки кремнегеля с целью получения на его основе технически важных продуктов. Громоздкость и неэкономичность предложенных технологических схем переработки кремнегеля обусловлена следующими факторами:

– высокая влажность исходного кремнегеля, что приводит к выделению огромного количества воды при его переработке и, соответственно, усложнению технологии, к тому же образуются фторсодержащие сточные воды. Обезвоживание кремнегеля путем термической обработки, реализованное в условиях Гомельского химического завода, существенно повышает стоимость конечного продукта, что делает его непривлекательным для потребителей;

– наличие в кремнегеле примесей в виде соединений алюминия и фтора, осложняет процесс его переработки, препятствуя растворению кремнезема в щелочном растворе, термическая обработка кремнегеля кислотными либо щелочными реагентами также не эффективна с экономической точки зрения.

Основным компонентом кремнегеля является аморфный кремнезем, который характеризуется высокой дисперсностью. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что кремнезем в кремнегеле находится в пассивном состоянии, его следует предварительно активировать. Однако осуществлять это следует не химическим либо термическим способом, которые приводят к технологическим проблемам, описанным выше, а механическим, поскольку данная стадия легко вписывается в технологические

схемы многотоннажных производств и не требует значительных затрат энергии.

В лабораторных условиях отработаны параметры процесса механоактивации кремнегеля производства ОАО «Гомельский химический завод». В результате ее использования резко возрастает реакционная способность кремнезема, снижаются технологические параметры синтеза силикатов (давление и температура), нейтрализуется вредное влияние примесных компонентов.

На основе полученных данных предложены промышленные варианты эффективных технологий производства многотоннажных продуктов на основе кремнегеля, а именно растворимых силикатов щелочных металлов с модулем 1,5–3,0, а также нерастворимых полисиликатов с модулем 4,5–6,5.

Инновационная технология получения жидкого стекла на основе кремнегеля предусматривает прямое растворение кремнезема едким натром при атмосферном давлении и температуре около 95 °С с получением щелочесиликатных растворов с силикатным модулем 1,5–2,9. Отличительной особенностью разрабатываемой технологии является использование влажного кремнегеля без подсушивания (влажность 60–65 %). Отделяемая в ходе активации вода является средой, в которой осуществляется синтез, щелочной компонент вводится в реактор в сухом состоянии, что упрощает технологический процесс. Регулирование влажности реакционной смеси осуществляется декантацией воды из активированной суспензии либо введением ее небольшого количества, в случае недостачи. Экономическая целесообразность использования предлагаемой технологии для получения жидкого стекла взамен традиционной автоклавной подтверждена расчетами.

Кроме того на основе активированного кремнегеля синтезированы силикаты щелочных металлов с модулем более 4 – граничного значения между растворимыми и нерастворимыми силикатами (полисиликатами). Путем вспенивания полисиликатов с модулем до 6,5 в интервале температур 300–400 °С получены водостойкие гранулированные материалы с плотностью 200 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, разрабатываемые одностадийные технологии производства гранулированных вспененных материалов и жидкого стекла позволяют решить проблемы утилизации кремнегеля, сократить количество и длительность производственных стадий, резко снизить себестоимость получаемых продуктов.

УДК 666.01

Н. М. Бобкова, проф., д-р техн. наук;  
Е. Е. Трусова, доц., канд. техн. наук,  
(БГТУ, г. Минск)

### **СОСТАВЫ СТЕКОЛ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЫХ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР**

Полые стеклянные микросферы (ПСМ) представляют собой легкосыпучие порошки, состоящие из тонкостенных (0,5–2,0 мкм) стеклянных полых частиц сферической формы диаметром 20–250 мкм. Благодаря уникальному сочетанию сферической формы, контролируемым размерам, низкой плотности, хорошим тепло-, звукоизоляционным и диэлектрическим свойствам ПСМ являются одним из важнейших техногенных сверхлегких наполнителей. Основой любого способа получения ПСМ является создание условий для растворения в расплаве неразложившихся газообразующих компонентов и выделение их в результате последующей диссоциации при повторном нагревании стекла. При синтезе силикатных стекол в качестве газообразующих компонентов выступают карбонаты, нитраты и сульфаты щелочных и щелочноземельных металлов. Однако первые два вида газообразующих – карбонаты и нитраты – обладают сравнительно низкими температурами, высокой скоростью разложения, и неспособностью сохраняться в силикатном расплаве без разложения, поэтому с точки зрения возможной растворимости в стекломассе без разложения при плавке стекла наибольший интерес представляют сульфаты, в частности сульфат натрия. Последний имеет температуру плавления без разложения равную 884 °С и обладает способностью смешиваться в определенных количествах с расплавом стекла при его синтезе. Температура разложения чистого сульфата натрия составляет 1200–1220 °С, в высоковязкой среде – до 1400–1440 °С. Такая способность поведения сульфата натрия в силикатных расплавах дает возможность получать при температурах 1300–1350 °С расплавы стекол с сохранением неразложившегося  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , смешенного с остальным расплавом стекла. Составы стекол для получения ПСМ должны быть достаточно легкоплавкими. В качестве основы для получения ПСМ выбраны составы стекол на основе  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--ZnO--CaO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$  систем с дополнительным введением сульфата натрия. Стекла синтезированы при 1350–1400 °С с выдержкой при максимальной температуре 2ч и последующей грануляцией на воду. На основе данных составов получены ПСМ размером 50–500 мкм, характеризующиеся насыпной плотностью 0,2–0,25 г/см<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности 0,05–0,07 Вт/м·К.

УДК 666.974:661.25

Т. В. Булай, ст. преп. (ГрГУ им.Я.Купалы, г. Гродно);  
М. И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;  
Н. М. Шалухо, ст. преп., канд. техн. наук;  
Д. М. Кузьменков, ст. науч. сотр., канд. техн. наук;  
А. В. Сушкевич, науч. сотр., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СЕРОБЕТОНА НА ОСНОВЕ КЕКА СЕРНОКИСЛОТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В последнее время значительно выросло количество исследований, направленных на использование серы в качестве вяжущего для изготовления серного бетона с дальнейшей его переработкой в готовые изделия. Одним из перспективных направлений использования серы является получение серного бетона для его применения в изготовлении строительных конструкций и изделий, подверженных агрессивному воздействию кислот и солей.

На сегодняшний день многие предприятия, использующие серу (ОАО «Гродноазот», ОАО «Гомельский химический завод»), столкнулись с проблемой утилизации отходов, которые образуются при плавлении и фильтрации расплавленной серы. Этот твердый отход – серный кек, содержит элементную серу в пределах от 27% до 87%. Данный отход относится к IV классу опасности, не востребован на рынке и запрещен к захоронению на полигонах, что приводит к его накоплению и, как следствие, к загрязнению окружающей среды. Решение проблемы переработки отходов в последнее время приобретает первостепенное значение. В условиях постоянного ухудшения экологической обстановки возникает необходимость обеспечить максимально возможную безвредность технологических процессов и безопасную утилизацию отходов.

Следует отметить, что в странах Северной Америки, располагающих большими запасами природной серы, бетоны, получаемые на ее основе, уже нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и строительстве благодаря удачному сочетанию в нем высокой химической стойкости и прочности. Поэтому основной задачей является получение новых строительных материалов, изготовленных с использованием серного кека с целью рационального использования отходов и снижения себестоимости продукции без ухудшения основных физико-механических свойств.

УДК 631.84

А.Ф. Минаковский, зав. каф., канд. техн. наук;  
К.В. Гриб, студ.; П.И. Баранов, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

**ПОЛУЧЕНИЕ СМЕШАННЫХ БЕСХЛОРНЫХ  
КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА  
КАЛИЯ НИВЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
МЕТОДОМ КОМПАКТИРОВАНИЯ**

Основным источником калия для питания растений является хлористый калий. Однако ряд культур не переносят ионы хлора, Поэтому обеспечение калием их возможно за счет внесения  $K_2SO_4$ .

В настоящее время мировой выпуск сульфата калия составляет 2,5 млн. т в год. В Калининградской обл. РФ реализуется проект по организации производства  $K_2SO_4$  проектной мощностью более 1 млн. т в год. Минералогический состав руды представлен каинитом, карналлитом, кизеритом и полигалитом.

Данный продукт может послужить как самостоятельным калийным удобрением, так и компонентом для производства бесхлорных NPKS удобрений. Производство сухих тукосмесей целесообразно организовать по методу прессования (компактирования).

Для выбора оптимального технологического режима компактирования была исследована зависимость статической прочности гранулята NKS и NPKS смесей от массового соотношения исходных компонентов, влажности смесей и удельного давления прессования.

В качестве исходных компонентов были выбраны карбамид, аммофос, сульфат аммония и сульфат калия, так как обладают высоким содержанием питательных элементов и хорошо поддаются прессованию, не требуя при этом ввода связующего вещества.

Полученные при удельном давлении прессования 50 кгс гранулы с влажностью 1 % обладают удовлетворительной статической прочностью (не менее 3 МПа), однако за счет присутствия в их составе хлоридов магния и кальция все полученные марки относятся к классу сильногигроскопичных.

Исследования показали, что предлагаемая технология позволяет получать бесхлорные комплексные удобрения в широком диапазоне соотношений питательных элементов с хорошими прочностными свойствами, а использование современных методов кондиционирования позволяет обеспечить их удовлетворительную гигроскопичность.

УДК 661.833

А. Н. Гаврилюк, ст. преп., канд. техн. наук;  
О. Б. Дормешкин, проф., д-р. техн. наук;  
М. В. Титок, студ., Д. Д. Канберг, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА СЛОЖНО-СМЕШАННЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА КАЛИЯ**

В настоящее время в мировой практике имеется большое многообразие технологических способов получения комплексных удобрений. Это обусловлено требованиями сельскохозяйственного производства, уровнем и условиями развития промышленности, сырьевой базой, техническими и материальными возможностями страны и другими причинами. Одними из важнейших показателей качества сложных удобрений являются: состав, общее содержание и растворимость питательных компонентов, входящих в их состав, физические свойства.

В последнее время широкое применение получили водорастворимые бесхлорные комплексные удобрения с различными микроэлементами. Основой для получения бесхлорных комплексных удобрений типа НРК является сульфат калия и все способы получения сложно-смешанных удобрений можно разделить на следующие группы:

- смешение твердых компонентов через плав или раствор;
- химическое взаимодействие реагентов в системах, включающих фосфатное сырье, минеральные кислоты, азот-, фосфор- и калий-содержащие соединения или удобрения.

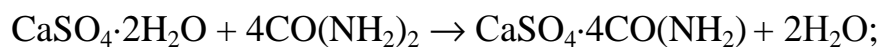
В связи с изложенными задачами представленной работы явилось получение НРК удобрений и установление химических превращений, протекающих в многокомпонентных системах, образующихся в производстве комплексных удобрений при добавлении сульфата калия и их влияние на свойства продукта в сравнении с базовой маркой ОАО «Гомельский химический завод» 16 : 16 : 16, полученной с использованием хлорида калия.

При анализе рентгенограмм продуктов установлено, что присутствующие в исходном сырье, применяемом на большинстве предприятий по производству минеральных удобрений соединения кальция и использование хлорида калия значительно усложняет химизм процесса: происходит образование хлористого аммония, а также аддуктов карбамида с сульфатом кальция или хлоридом аммония, что может оказать существенное влияние на физико-химические и физи-

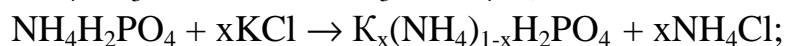
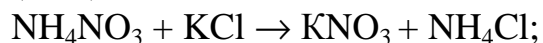
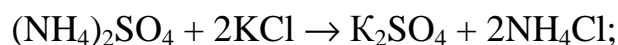
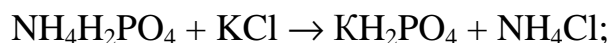


ко-механические свойства конечного продукта. Возможно протекание следующих реакций:

– на стадии введения карбамида:



– на стадиях введения KCl и сушки продуктов:



При этом в солевых системах, образующихся на различных стадиях получения сложно-смешанных удобрений при использовании сульфата калия значительных превращений не происходит, что положительно скажется на прогнозировании конечного состава удобрения и его свойств.

При этом физико-механические свойства гранулированных бесхлорных комплексных удобрений на основе сульфата калия характеризуются высокой статической прочностью и практически не слеживаются. Они обладают высокой гигроскопичностью, причем значение гигроскопической точки не зависит от способа получения бесхлорных комплексных удобрений. Это можно объяснить применением технического сульфата калия содержащего до 1% масс. хлоридов магния и кальция, которые повлияли на высокую гигроскопичность испытуемых композиций, и приводят к высокой сорбции воды на поверхности твердого тела и шероховатой поверхностью гранул, что приводит к образованию на поверхности водорастворимых материалов водно-солевых комплексов, которые, в свою очередь, при движении приводят к постепенному размыванию пор, увеличивая их диаметр, что приводит к ликвидации менисков и капиллярного сжатия структуры и восстановлению газового диффузионного потока.

Поэтому при разработке технологической схемы необходимо предусмотреть стадию модифицирования поверхности гранул антислеживателями, что приводит к аккумулялированию влаги гранулы частицами добавки и препятствует образованию водно-солевых комплексов и протеканию поверхностно-диффузионных процессов.

УДК 666.3-127.7

Ю. Г. Павлюкевич, доц., канд. техн. наук;

Н. Н. Гундилович, мл. науч. сотр. (БГТУ, г. Минск)

**МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ С МИКРОФИЛЬТРУЮЩИМ СЛОЕМ  
ИЗ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Проведены комплексные экспериментально-теоретические исследования по получению многослойных пористых проницаемых материалов на основе корундовой и кварцевой керамики с микрофильтрующим слоем из структурированных тонкодисперсных керамических порошков, полученных методом иницируемого экзотермического синтеза в растворах нитрат-органического прекурсора.

Установлено, что процесс структурообразования частиц при экзотермическом синтезе из нитраторганических прекурсоров в системах  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ , содержащих 97,0–99,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , заключаются в формировании пористых агрегатов ультрадисперсных кристаллитов, вследствие протекания процесса кипения прекурсора в пленочном режиме с последующим иницированием экзотермической реакции, сопровождающейся разрушением пленок при интенсивном газовыделении.

Структура разработанных микрофильтрующих материалов представлена двухслойным пористым проницаемым материалом. Толщина мембранного покрытия составляет 30–50 мкм, наблюдается проникновение частиц мембранного слоя в поры подложки на глубину 5–10 мкм. Мембранное покрытие имеет однородную бездефектную структуру, которая повторяет морфологию применяемого порошка. Поровая структура покрытия представлена развитой сетью открытых каналобразующих макропор щелевидной формы, средний эквивалентный диаметр которых составляет 1–4 мкм.

Разработаны составы керамических масс и технология изготовления двухслойных микрофильтрующих керамических материалов на основе корундовой и кварцевой керамики с добавлением полифенилсилоксановой смолы в качестве связующего, обеспечивающие высокие физико-химические и эксплуатационные характеристики изделиям. Полученные результаты подтверждены лабораторными и опытно-промышленными испытаниями на предприятиях Республики Беларусь.

УДК 661.842'053.2-047.84

М.А. Комаров, магистрант;  
М.И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;  
Н.Г. Короб, научн. сотр.;  
Д.М. Кузьменков, ст. научн. сотр., канд. техн. наук;  
А.А. Сакович, проректор по учебной работе, канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **СТРУКТУРНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ ДИГИДРАТА СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ**

В Республике Беларусь отсутствует природное гипсовое сырье. В этой связи наличие доступного карбонатного сырья и отработанной, не используемой повторно серной кислоты создает условия для получения синтетического дигидрата сульфата кальция.

Синтез дигидрата сульфата кальция по предлагаемой технологии будет складываться из следующих переделов: приготовление суспензии карбоната кальция (меловой или известковой); взаимодействие серной кислоты с суспензией карбоната кальция; стадия роста образующихся сростков кристаллов синтетического гипса; отделение осадка дигидрата сульфата кальция от маточного раствора.

Одной из важных технологических операций разрабатываемого процесса является нейтрализация серной кислоты карбонатом кальция с получением кристаллов дигидрата сульфата кальция заданного габитуса и выделением его из маточного раствора. Установлено, что эффективность этой технологической операции зависит от многих факторов, а именно: продолжительности разложения меловой суспензии; длительности сгущения полученной суспензии синтетического гипса; качества воды, используемой для приготовления меловой суспензии, наличия затравочных центров кристаллизации.

На первоначальном этапе получаемые частицы синтетического гипса имели в основном размеры 10–50 мкм, но в ходе проведенных системных исследований были подобраны оптимальные значения основных технологических параметров структурно-управляемого синтеза синтетического дигидрата сульфата кальция, которые позволили получать частицы размером 200–500 мкм.

Получаемый синтетический дигидрат сульфата кальция может использоваться как целевой продукт, так и для переработки на различные гипсовые вяжущие – строительный гипс, высокопрочное гипсовое вяжущее и ангидритовое вяжущее. Это обусловлено тем, что в получаемом синтетическом гипсе содержится 95–97% дигидрата сульфата кальция, что соответствует природному гипсовому камню I сорта.

УДК 666.295.5

И.А. Левицкий, проф., д-р техн. наук;  
А. Н. Шиманская, мл. науч. сотр., канд. техн. наук;  
Е. А. Ерш, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫЕ ГЛАЗУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИХ СТРУКТУРЫ**

Целью исследования является получение блестящих металлизированных глазурных покрытий для керамогранита, обладающих физико-химическими свойствами и декоративно-эстетическими характеристиками в соответствии с ГОСТ 6787.

Глазурные композиции включали сырьевые материалы при следующем соотношении, мас. %: многокальциевая алюмоборосиликатная фритта 2/154 (производственный состав ОАО «Керамин», г. Минск, Республика Беларусь) – 22,5–32,5; полевой шпат – 25,0–30,0; оксид меди (II) – 10,0–17,5; содержание остальных компонентов (оксид железа(III), глинозем, доломитовая мука, огнеупорная глина, кварцевый песок) не изменялось и в сумме составляло 35 мас. %.

Шликер готовился совместным мокрым помолом компонентов шихты в шаровой мельнице (Speedy, Италия) до остатка на сите № 0056 в количестве 0,1–0,3 мас. % при соотношении материал : мелющие тела : вода, составляющим 1:1,5:0,5. Полученная суспензия влажностью ( $50 \pm 1$ ) мас. % наносилась на высушенный до влажности не более 0,5 % полуфабрикат керамических плиток. Покрытые опытными составами глазури образцы керамогранита подвергались обжигу в печи FMS-2500 при температуре ( $1200 \pm 5$ ) °C в течение ( $50 \pm 2$ ) мин на ОАО «Керамин».

Синтезированные глазурные покрытия характеризовались серо-черным цветом и блестящей фактурой поверхности. Блеск глазури оптимального состава составил 100 %; твердость по шкале Мооса – 5,5; температурный коэффициент линейного расширения –  $72,1 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ; микротвердость – 6500 МПа; термическая стойкость – 125 °C; степень износостойкости – 1, химическая стойкость соответствует требованиям ГОСТ 27180. С помощью рентгенофазового анализа и электронной микроскопии установлено, что полученные покрытия обладают стеклокристаллической структурой, основными кристаллическими фазами являются тенорит (CuO) и маггемит ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).

Проведенные испытания в заводских условиях ОАО «Керамин» показали реальную возможность использования разработанных покрытий в промышленном производстве.

УДК 533.9.15

Ю.Г. Павлюкевич, доц., канд. техн. наук;  
П.С. Ларионов, магистрант  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ СИНТЕЗА И ОБРАБОТКИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время область применения низкотемпературной плазмы непрерывно расширяется. Многие процессы, такие как резка и плавление металлов, напыление покрытий различного назначения (жаростойких, износостойких, полупроводниковых и др.), обработка диэлектрических материалов, сфероидизация мелких частиц, проводятся преимущественно с использованием низкотемпературной плазмы.

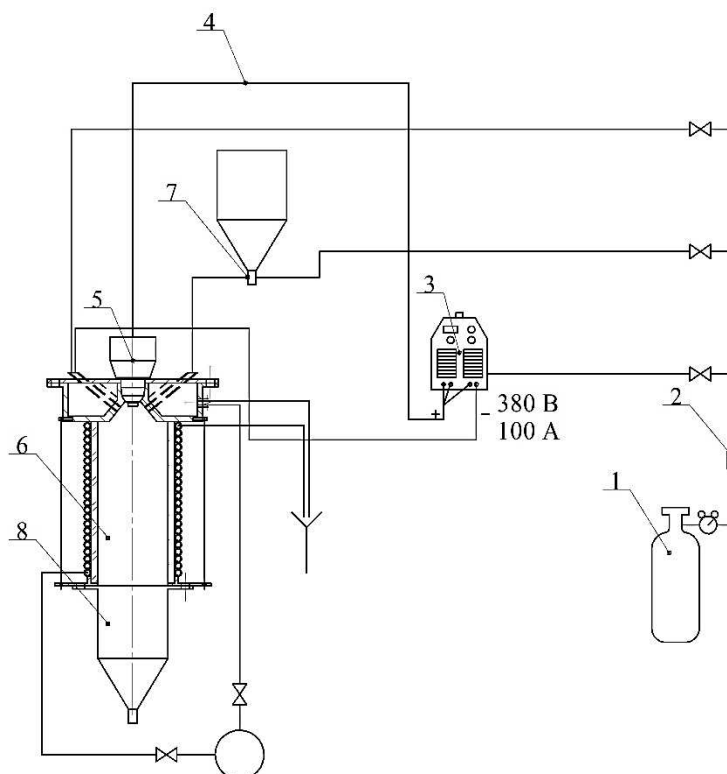
С помощью низкотемпературной плазмы получают микро- и наноразмерные порошки сферической формы таких соединений как оксиды, нитриды, карбиды и бориды различных элементов (титана, циркония, гафния, ванадия, ниобия, тантала, вольфрама, бора, кремния, магния, иттрия, алюминия и др.). С помощью плазмохимического синтеза также можно получать многокомпонентные порошки, такие как смесь карбидов и нитридов, нитридов и боридов и др. Также, благодаря использованию низкотемпературной плазмы, получают такие уникальные вещества, как соединения благородных газов (например, фториды ксенона) [1].

Благодаря высокой температуре и электропроводности, низкотемпературная плазма оказывает чрезвычайно мощное энергетическое воздействие на обрабатываемые вещества, выступая в роли как универсального теплоносителя, так и реагента [2].

Все технологии, использующие низкотемпературную плазму обладают общими особенностями, а именно большой чистотой получаемых материалов, бездефектностью, регулируемостью и высокой скоростью протекающих процессов.

На кафедре технологии стекла и керамики БГТУ для проведения плазмохимического синтеза нанодисперсных порошков и сфероидизации мелких частиц, нанесения функциональных керамических покрытий на материалы различного назначения разработана установка, схема которой показана на рисунке.

Установка включает в себя инверторный генератор токов высокой частоты, реактор, плазмотрон, систему охлаждения реактора и плазмотрона.



**Рисунок – Схема установки плазмохимического синтеза**

Принцип работы установки состоит в следующем. Из баллона 1 плазмообразующий газ подается в плазменную установку 3 через влаговыделитель 2. Влаговыделитель 2 устанавливается при повышенной влажности плазмообразующего газа. Далее по шлангопакету 4 плазмообразующий газ подается в плазмотрон 5, подключенный к реактору 6. В реактор 6 с помощью транспортирующего устройства 7 подается исходный материал. Реактор 6 оснащен системой охлаждения. Синтезированный материал удаляется из реактора 6 с помощью разгрузочного устройства 8.

В зависимости от типа и требуемых свойств синтезируемой фазы в качестве плазмообразующего газа может выступать воздух, азот, аргон, водород, кислород и др. При использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа вместо баллона 1 устанавливается компрессор.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Григорьев, С.Н. Технологии нанобработки / С.Н. Григорьев, А.А. Грибков, С.В. Алешин. – Старый Оскол: ТНТ, 2008.

2 Каренгин, А.Г. Физика и техника низкотемпературной плазмы / А.Г. Каренгин. – Томск: Томский политехнический университет, 2008.

УДК 666.638

Р. В. Головач, магистрант;  
Е. М. Дятлова, доц., канд. техн. наук;  
О. А. Сергиевич, ассист., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ**

Нанопористые материалы можно рассматривать как нанокompозитные, в которых поры играют роль второй фазы, случайно или закономерно распределенной в матрице. Все методы заполнения пористых структур функциональными материалами имеют свои особенности. В основе процесса осаждения керамических пленочных покрытий из газовой фазы лежат реакции химического взаимодействия паров галогенидов металлов с газами либо реакции пиролиза элементоксиорганических соединений. Получение тонкослойных керамических покрытий испарением с последующей конденсацией в вакууме затруднено, так как при нагревании в таких условиях оксиды термически диссоциируют. Керамические покрытия могут быть получены металлизацией поверхности покрываемого изделия с последующей окислительной обработкой нанесенного слоя.

Для синтеза керамических нанокompозитов выбраны керамическая матрица на основе  $Al_2O_3$ , а в качестве заполнителя – модифицированный феррит висмута. Выбранные методы заполнения отличаются простотой нанесения синтезированных покрытий с оптимальной скоростью их образования.

Микроскопическое исследование нанопористых матриц с определением их стericеских характеристик показало возможность их заполнения керамической субстанцией на основе нанодисперсного феррита висмута и различных дисперсионных сред. В работе использованы три физических метода (осаждение материала в поры без давления, под давлением и под воздействием магнитного поля) и один химический: заполнение растворами прекурсоров с последующей термической обработкой. Изучение микроструктуры полученных покрытий показало, что заполнение пор дисперсией, содержащей основную фазу феррита висмута, эффективнее, чем растворами прекурсоров с последующим температурным синтезом на поверхности подложки. Модифицированный нанодисперсный феррит висмута может быть использован для получения функциональных покрытий нанокристаллических структур, применяемых в изделиях электронной техники.

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

## **МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛОПОДОБНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА**

В организме человека наиболее распространенным минералами являются фосфаты и их аналоги.

Кости человека состоят примерно на 70% из фосфата кальция и на 30% из органического вещества. Чаще всего это или аморфное соединение или кристаллы призматического габитуса. В младенческом возрасте кости представлены аналогом аморфного апатита, с возрастом постепенно раскристаллизовываются и кристаллы растут по размерам, при этом кость становится хрупкой.

В некоторых злокачественных опухолях обнаружены кристаллики биогенного апатита размером до 20 мм.

Эмаль зубов состоит на 96 мас.% из биогенного аналога апатита, а дентин – на 70 мас.% из этого же минерала. Эмаль зубов имеет строение в виде призм, скрепленных белковыми соединениями. В свою очередь каждая из призм представлена кристаллами биогенного апатита, помещенного в белковое вещество.

Ушные камни в вестибулярном аппарате человека являются мельчайшими кристалликами биогенного кальцита  $\text{CaCO}_3$ .

В легких пациентов, страдающих туберкулезом, присутствуют аналоги апатита и витлокита  $[(\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2)]$ .

Исследованиями установлено, что камни в почках, мочевые камни, камни в печени, желчном пузыре, образования в аортах представлены фосфатами, карбонатами, оксалатами и уратами.

Зубной камень, слюнный камень, хрящи в межпозвоночных дисках и трахее сложены также аналогами апатита, витлокита, ортофосфата кальция.

Больные суставы при подагре включают пирофосфат кальция – дигидрат типа  $\text{Ca}_2\text{P}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Мочевые камни образованы в большинстве своем аналогом струвита  $\text{Mg}(\text{NH}_4)(\text{PO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Зубные камни и затвердения в костях пожилых людей сложены аналогом брушита  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Эти сведения необходимы материаловедцам при проведении исследований по разработке материалов для костных имплантатов, инертных материалов ортопедии, стоматологических и других материалов.



УДК 666.223.9

М. В. Дяденко, доц., канд. техн. наук;  
Л. Ф. Папко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
А. В. Кузьмин, зав. лаб., канд. хим. наук (ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург);  
Н.М. Поротникова, канд. хим. наук (УрФУ, Екатеринбург)

### **СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Топливный элемент (ТЭ) представляет собой электрохимическую ячейку, которая напрямую преобразует химическую энергию реакции топлива и окислителя в электрическую энергию.

ТОТЭ – это энергосберегающие установки на базе твердооксидных топливных элементов, которые работают на газе либо водороде с получением в ходе химической реакции электроэнергии и выделением тепла утилизируемого для нужд отопления, холодоприготовления или повторного использования на парогенераторных установках.

Проблема герметизации ТЭ является одной из наиболее сложных из числа проблем, связанных с изготовлением стека планарных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Это связано с высокой рабочей температурой, составляющей порядка 1000 °С, и жесткими требованиями по совместимости по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов.

Целью исследования является разработка составов стеклокристаллических материалов, предназначенных для склейки и герметизации ТОТЭ. Материалы, применяемые в качестве герметика, должны обеспечивать согласование по ТКЛР со спаиваемыми материалами, стабильность свойств при длительной термической нагрузке при температуре до 900 °С, отсутствие химического взаимодействия с материалами ТОТЭ.

В качестве основы для исследования выбраны системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{RO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  и  $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , где  $\text{RO} - \text{CaO}, \text{MgO}, \text{SrO}, \text{BaO}, \text{ZnO}$ .

Для получения вакуумплотных спаев используют порошки стекол с достаточно низкой кристаллизационной способностью. В частности, стекла системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  в процессе их градиентной термообработки проявляют поверхностную кристаллизацию. Напротив, активная кристаллизация стекол системы  $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  приводит к формированию пористой структуры стеклокристаллических материалов.

Показатели ТКЛР имеют важное значение при выборе составов. Герметик должен быть согласован по ТКЛР со спаиваемыми материалами. ТКЛР материала интерконнектора составляет  $110 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , а ТКЛР керамики значительно меньше –  $95 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Соответственно по-

казатели ТКЛР стеклогерметика должны быть промежуточными.

Дилатометрическим методом установлено, что температурный коэффициент линейного расширения стеклокристаллических материалов изменяется в пределах  $(57-105) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Высокие показатели ТКЛР, требуемые для получения согласованного с элементами ТОТЭ спая и составляющие порядка  $(99-105) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , характерны для стекол системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .

Для герметизации ТОТЭ используют стекла в порошкообразном состоянии с введением связующего. Обжиг порошкообразных образцов стекол осуществлялся на керамической подложке при температуре 1050–1100 °С в течение 30 мин. По результатам формирования стеклогерметиков выбран оптимальный состав стекла, на основе которого получен стеклокристаллический материал, обеспечивающий согласование по ТКЛР с элементами ТОТЭ. По данным рентгенофазового анализа основными кристаллическими фазами материала являются нефелин  $\text{Na}[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8]$  и диопсид  $\text{MgCa}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ .

Произведен анализ образца стекла оптимального состава методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), по результатам которого установлено, что температура стеклования составляет 605,6 °С, температура размягчения – 633,5 °С, температура максимума кристаллизации – 871,7 °С, а температура плавления – 1133,3 °С. Следует отметить, что температура максимума кристаллизации расположена ниже рабочей температуры топливного элемента, что позволяет сделать вывод об исключении вероятности активной кристаллизации остаточной стеклофазы при указанной температуре.

Как известно, на кристаллизационную способность значительное влияние оказывает дисперсный состав образца. В связи с этим выполнен гранулометрический анализ порошка, используемого для формирования спая. Установлено, что размер частиц изменяется в пределах 0,1–50 мкм, при этом преобладающее количество частиц находится в диапазоне 10–20 мкм.

Для оценки влияния длительной выдержки ситаллоцемента при рабочей температуре проведена его циклическая термообработка продолжительностью 6–18 ч, по результатам которой установлено, что значение ТКЛР ситаллоцемента остается стабильным.

Исследования выполнены в рамках совместного проекта РФФИ и БРФФИ (грант РФФИ № 17-58-04116, грант БРФФИ № X17PM-033)

УДК 546.723 + 546.742 + 531.212; 691.316

Л. С. Ещенко, проф., д-р техн. наук;  
А. А. Мечай, зав. каф. ХТМВ, доц., канд. техн. наук;  
М. В. Попова, науч. сотр.;  
К. В. Бородина, магистрант  
(БГТУ, г. Минск)

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЖЕЛЕЗОКСИДНЫХ ПИГМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОКРАШИВАНИЯ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

Актуальной проблемой является разработка способов переработки железного купороса на пигментный  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , направленных на снижение энергопотребления, количества технологических стадий, охрану окружающей среды. Особую значимость приобретает создание пигментных материалов с низкой стоимостью для строительной отрасли. Исходя из этого, целью работы явилась разработка низкотемпературного термощелочного способа получения пигментных материалов на основе железного купороса.

Исходными реагентами явились: известь ( $\text{CaO}$  – 87,7,  $\text{CaCO}_3$  – 12,3 мас. %), железный купорос ( $\text{FeSO}_4$  – 47,8; кристаллизационная  $\text{H}_2\text{O}$  – 47,3; свободная  $\text{H}_2\text{O}$  – 3,7; свободная  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 1,2 мас.%), кальцинированная сода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Степень конверсии сульфата железа рассчитывали исходя из содержания сульфат-иона до и после термообработки реакционной массы. Фазовый состав продуктов и их малярно-технические свойства определяли по стандартным методикам.

Показано влияние мольного соотношения  $\text{H}_2\text{O}:\text{CaO}$ ,  $\text{CaO}:\text{SO}_4^{2-}$ , температуры и продолжительности термообработки на образование и формирование структуры  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Установлено, что максимальная степень конверсии достигает 96–98% при мольных соотношениях  $\text{CaO}:\text{SO}_4^{2-}$  равном 1,05–1,15,  $\text{H}_2\text{O}:\text{CaO}$  – 2,3–3,0 и температуре термообработки реакционной смеси 500–600°C. Образовавшийся при данных условиях продукт содержит  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  и обладает малярно-техническими свойствами, характерными для пигментных материалов, в частности пигментов-наполнителей (укрывистость 15–25 г/см<sup>3</sup>, маслосемкостью 58–65 г/100г).

Установлена зависимость степени термощелочной конверсии сульфата железа (II) от температуры и соотношения реагентов в системе  $\text{FeSO}_4$ – $\text{H}_2\text{SO}_4$ – $\text{Na}_2\text{CO}_3$ – $\text{H}_2\text{O}$ – $\text{O}_2$ . Показано влияние серной кислоты, присутствующей в техническом железном купоросе, на степень окисления  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$ , состав продуктов, образующихся в исследуемой системе в интервале температур 80–300°C.

Определена укрывистость продуктов термощелочной конверсии

железного купороса. Показано, что независимо от типа щелочного реагента, состава реакционной смеси с ростом температуры термообработки с 300 до 600°C укывистость падает, что является следствием повышения кроющей способности пигментных материалов. Установлено, что укывистость продуктов, полученных на основе железного купороса и кальцинированной соды и термообработанных в интервале температур 500–600°C, имеет близкое значение к укывистости железозакальцийсодержащих продуктов, полученных в системе  $\text{FeSO}_4\text{--H}_2\text{SO}_4\text{--CaO--H}_2\text{O--O}_2$ .

Полученные пигментные материалы использовали в процессе приготовления силикатной смеси, состоящей из известково-пещаного вяжущего и песка-заполнителя при массовом соотношении 1:3,5. Доля пигментного материала составляла 0,5–3% от массы сухой силикатной смеси.

Исследован процесс гидросиликатного твердения в системе  $\text{Ca(OH)}_2\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  в присутствии синтезированных пигментных материалов и изучены физико-механические свойства составов окрашенного силикатного кирпича. Анализ продуктов гидратации силикатного кирпича, окрашенного пигментными материалами, свидетельствует о том, что они не являются полностью инертными и ускоряют процесс образования низкоосновных гидросиликатов кальция группы CSH(I), отвечающих за прочность силикатного кирпича. Установлено на рентгенограммах данных продуктов снижение интенсивности пиков  $\beta$ -кварца по сравнению с контрольными образцами, что свидетельствует о более полном его связывании в низкоосновные гидросиликаты кальция и повышении при этом прочности окрашенных образцов силикатного кирпича по сравнению с контрольными. Показано, что содержание кристаллизационной воды в данных образцах значительно выше, чем у контрольного образца, что обуславливает повышение содержания продуктов твердения и, соответственно, прочности твердеющей системы. Прочность образцов окрашенного силикатного кирпича составляет от 20 до 31 МПа, водопоглощение 8,6–9,9%, морозостойкость – не менее F35. Физико-механические свойства разработанных составов силикатного кирпича с окраской от красно-коричневого до насыщенного коричневого цвета соответствуют требованиям СТБ 1228–2000 «Кирпич и камни силикатные. Технические условия».

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

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛОТНОСПЕКШИХСЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ**

Плотнospекшиеся керамические материалы – керамический клинкерный кирпич и клинкерная плитка характеризуются плотнospекшимся черепком, водопоглощение которых не превышает 3 %, обладают высокими механическими свойствами и морозостойкостью.

Получение указанных материалов осуществлялось в системе сырьевых компонентов, включающих глину тугоплавкую месторождения «Городное» Брестской области, суглинков месторождения «Фаниполь» Минской области, глины тугоплавкой марки БК-0 Липецкой области (Россия), а также гранитоидных отсевов.

Изготовление образцов изделий осуществлялось из пластических масс с последующим обжигом при температуре 1100–1180 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 1–2 ч.

Образцы характеризуются усадкой 3,6–5,2 %, водопоглощение изменяется от 2,4 до 0,06 %. Механическая прочность образцов находится в пределах 43,9–57,8 мПа, износостойкость – 0,03–0,07 г/см<sup>2</sup>, морозостойкость не менее 150 циклов. ТКЛР синтезированных масс имеет значение  $(76,4–83,2) \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$ . Образцы характеризуются темно-коричневым и шоколадным насыщенным цветом.

Столь высокие показатели основных физико-механических свойств достигаются в результате протекания высокотемпературных процессов, обеспечивающих формирование плотной структуры керамических образцов. В интервале температур 750–900 °С сказывается влияние преобладающего количества в составе масс суглинка и тонкозернистого гранитоидного отсева, имеющих повышенное содержание оксидов железа и титана, а также щелочных и щелочно-земельных металлов. Они обеспечивают в данной сложной системе образование значительного количества жидкой фазы.

Рентгенофазовым анализом установлено наличие муллита, анортита, кварца при незначительном содержании гематита. Присутствует значительное количество стекловидной фазы, о чем свидетельствует наличие гало на рентгенограммах образцов.

УДК 666.7:661.8:661.8'045.3

С.А. Лыщик, магистрант;  
М.И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;  
Н.М. Шалухо, ст. научн. сотр., канд. техн. наук;  
Н.Г. Короб, науч. сотр.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ НА ФОСФАТНОЙ СВЯЗКЕ**

В настоящее время в Республике Беларусь различного рода огнеупорные материалы, используемые в тепловых агрегатах, после демонтажа не перерабатываются для повторного использования и не утилизируются, а складываются. Поэтому основной целью настоящей работы явилась разработка составов огнеупорных материалов с использованием техногенных продуктов. Наиболее востребованными и перспективными связующими для получения таких материалов могут быть фосфатные связки, представляющие собой, как ортофосфорную кислоту и олигофосфорные кислоты, так и фосфатные связки: алюмофосфатная, алюмохромфосфатная, магний фосфатная, полифосфата натрия и др. Преимуществом таких связок является придание композиционным материалам высокой термостойкости, что является очень востребованным для многих тепловых агрегатов, работающих в жёстком режиме термоциклирования.

В качестве фосфатной связки была взята ортофосфорная кислота, а заполнителем и отвердителем бой периклазохромитового и хромитопериклазового огнеупора. Предварительно его дробили, подвергали помолу, классифицировали на фракции и составляли сырьевые смеси с различным содержанием и концентрацией кислоты. Полученные смеси формовались путём прессования под давлением 30 МПа. Отличительной особенностью разработанных составов является быстрый набор прочности при комнатной температуре, т.е. технология получения является безобжиговой, что позволяет экономить на затратах для термообработки. Наилучший состав имел следующие характеристики: прочность на сжатие в возрасте 2-х суток – 48,1 МПа, прочность на сжатие после 4-х часов обжига при  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 27,3 МПа, термостойкость (850  $^{\circ}\text{C}$  – вода) > 8 циклов, плотность – 2860 кг/м<sup>3</sup>, линейная усадка / расширение – < 0,5 %, ППП – 4%.

Технологический процесс получения огнеупорных материалов на основании исследований данной работы отрабатывается на ЧПУП «БелХимос» (г. Лепель) с целью использования их на предприятиях Республики Беларусь.

УДК 666.189.3

Б.П. Жих, асп.;  
И.М. Терещенко, доц., канд. техн. наук;  
А.П. Кравчук, ст. преп., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СИЛИКАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОВЫШЕННЫМ МОДУЛЕМ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕГЕЛЯ**

В ходе исследования, проведенного на кафедре технологии стекла и керамики, разработаны основы технологии получения растворимых силикатов щелочных металлов (силикатный модуль 1,5–3,0) методом прямого растворения кремнегеля в щелочных растворах. Необходимым условием для реализации разработанной технологической схемы является предварительная механоактивация кремнегеля – твердого отхода фосфатных производств, который в настоящее время отвозится в отвалы.

При получении нерастворимых силикатов преследуются несколько иные цели в сравнении с синтезом растворимых силикатов, где основной задачей является полное растворение кремнезема с образованием моно-, ди- и полимерных структур  $\text{SiO}_2$  (полная деполимеризация). В случае с нерастворимыми силикатами это лишь начальная стадия процесса синтеза.

Исследование показало, что синтез полисиликатов на основе водной щелочносиликатной системы  $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--H}_2\text{O}$  – многостадийный процесс, причем отдельные его стадии могут протекать последовательно, но могут и накладываться друг на друга. При синтезе полисиликатов на основе кремнегеля выделено четыре стадии:

- первичная коагуляция смеси в результате роста ионной силы суспензии после введения  $\text{NaOH}$ , которая может сопровождаться схватыванием смеси;
- растворение  $\text{SiO}_2$  в щелочном растворе с диспергацией первично образовавшихся коагуляционных комплексов;
- развитие процессов поликонденсации, продуктов растворения, сопровождаемых выделением воды;
- коагуляция и гелеобразование, характеризующиеся формированием вторичных структур и сопровождаемые монотонным повышением вязкости вплоть до полного затвердевания и перехода в хрупкое состояние.

### РАЗРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАСС ДЛЯ ОБЪЕМНО ОКРАШЕННОГО КИРПИЧА

В настоящее время наиболее востребован на строительном рынке объемно окрашенный керамический кирпич. Он может быть светлого или темно-красного цвета в зависимости от содержания в легкоплавких глинах железистых и карбонатных примесей. Тонкодисперсные железистые примеси придают обожженному керамическому черепку цвет от кремового до красного при окислительной атмосфере обжига. Критерием оценки цвета является соотношение  $Fe_2O_3/CaO$ . Если это отношение меньше 0,3 – цвет черепка светлый и светло-желтый. Механизм осветления заключается в образовании двухкальциевого феррита  $2CaO \cdot Fe_2O_3$ . В состав керамической массы, содержащей легкоплавкую глину, кварцевый песок вводили тонкоизмельченный карбонат кальция, используя отходы ТЭЦ, содержащие непрореагировавшие зерна извести, содержащие до 86 %  $CaO$ . Для интенсификации процесса спекания в состав исходной массы добавляли стеклобой. Обжиг проводили при температуре  $1050 \pm 10^\circ C$ .

При получении керамического черепка темно-красного цвета установлено, что соотношение  $Fe_2O_3/CaO$  должно быть более 5. В состав исходной керамической массы вводили железосодержащие шлаки – отходы Белорусского металлургического завода (БМЗ). Шлак мелкодисперсный содержит до 36 %  $Fe_2O_3$  и 2 %  $Mn_2O_3$ . Исследовано влияние температуры обжига, количество вводимого БМЗ, на цвет и физико-химические свойства образцов. Методами ДТА, РФА установили возможные процессы, протекающие при обжиге, а также фазовый состав, в котором после обжига при температуре  $1050 \pm 10^\circ C$  обнаружены гематит, маггемит, анортит,  $\alpha$ -кварц. Повышенное содержание железа в форме гематита способствует более интенсивному переходу кварца в  $\alpha$ -кристобалит и в  $\beta$ -модификацию, что приводит к нарушению внутренней структуры образца и снижению морозостойкости. Чтобы уменьшить количество гематита в составе массы, вводили ваграночный шлак, который содержит  $CaO$ . Установили оптимальное количество добавки ваграночного шлака, которое составило 10%. В результате обжига образуется двухкальциевый феррит  $2CaO \cdot Fe_2O_3$ .



УДК 549.2

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

## ПРОЗРАЧНЫЕ ПОЛУФРИТТОВАННЫЕ ГЛАЗУРИ ДЛЯ КЕРАМОГРАНИТА

Прозрачные блестящие полуфриттованные глазури применяют при декорировании керамогранита методом принтерной печати с целью сохранности рисунка, интенсификации цвета применяемых красителей и повышения износостойкости глазурного слоя.

Синтез прозрачных глазурей осуществлялся в системе сырьевых материалов, включающих, мас. %: фритта промышленного состава 2/154 – 36–45; полевой шпат вишневогорский – 28–36; доломитовая мука – 1–9; каолин КН – 83–5; глинозем технический – 5; глина «Веско-Гранитик» – 10 и кварцевый песок – 5.

Температурный коэффициент линейного расширения синтезированных глазурей составляет  $(60,6–61,2) \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$ , микротвердость 5720–5780 МПа, истираемость – 2 степень. Покрытие обладает термостойкостью 200°C, химически устойчиво.

Рентгенофазовым анализом установлена рентгеноаморфность покрытий или наличие малоинтенсивных кристаллических образований анортитоподобной фазы. Следует отметить, что ее показатель преломления составляет 1,57–1,58. Сканирующим электронно-микроскопическим анализом установлено наличие микроскопических неоднородностей размером 0,1–0,3 мкм в виде единичных уплощенных изометричных зерен, которые не оказывают практического влияния на снижение прозрачности синтезированных покрытий.

Дифференциально-сканирующим анализом установлены термические эффекты, связанные с разложением каолитовой составляющей шихты, декарбонизацией доломита, плавлением фриттованной составляющей и компонентов сырьевой смеси.

Апробация синтезированного глазурного покрытия в условиях ОАО «Керамин» подтвердила реальную возможность использования синтезированного покрытия для декорирования керамогранита. Обжиг покрытий осуществлялся в промышленной конвейерной печи при температуре  $1190 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение  $50 \pm 2$  мин.

Полученное в заводских условиях глазурное прозрачное покрытие отвечает требованиям нормативно-технической документации.

УДК 631.84

А.Ф. Минаковский, зав. кафедрой, канд. техн. наук;  
В.И. Шатило, доц., канд. техн. наук;  
Н.С. Дашко, асп.; В.Г. Карчевская, магистрант  
(БГТУ, г. Минск)

## **ТЕХНОЛОГИЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ЖИДКИХ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Жидкие удобрения обладают рядом преимуществ перед твердыми как в производстве, так и при хранении и использовании, что обуславливает стабильный спрос на них у аграриев. Применение эффективных жидких комплексных удобрений (ЖКУ) – одно из направлений развития сельскохозяйственных технологий. ЖКУ широко применяются в странах с высокой агрокультурой – США, Австралии, Франции, Испании, Великобритании.

Разработка новых видов концентрированных жидких азотсодержащих удобрений, имеющих в своем составе калий, фосфор, серу позволит значительно повысить спрос на них наряду с решением проблемы рентабельного использования сульфата аммония, побочного продукта производства капролактама.

На первом этапе работы изучена растворимость в системах «карбамид-нитрат аммония-сульфат аммония-вода», «карбамид-сульфат калия-сульфат аммония-вода», «карбамид-нитрат аммония-сульфат калия-вода», «карбамид-нитрат аммония-дигидрофосфат аммония-вода», «карбамид-сульфат аммония-дигидрофосфат аммония-вода» при температуре 0°C.

На основе полученных данных по растворимости в исследуемых системах разработаны новые составы жидких комплексных азотно-сульфатных, азотно-калийно-сульфатных и азотно-фосфорно-сульфатных удобрений. Изучены свойства разработанных жидких удобрений (плотность, вязкость, коррозионная активность). Установлено, что коррозионная активность жидких NKS удобрений в 20 раз ниже по сравнению с NS-удобрениями, а азотно-фосфорно-сульфатные имеют наименьшее значение по этому показателю.

Наработана опытная лабораторная партия жидких азотно-сульфатных и азотно-калийно-сульфатных удобрений марок 22:0:0:7(S), 16:0:6:12(S), 21:0:3:1(S) и исследована их агрохимическая эффективность. Разработана гибкая технологическая схема получения жидких комплексных удобрений различных марок.

УДК 614.842.6:661.635.131

Е.И. Румынская, асп. (БНТУ, г. Минск);  
М.И. Кузьменков, проф., д-р техн. наук;  
Н.Г. Короб, научн. сотр.;  
А.В. Сушкевич, научн. сотр., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОГНЕЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ АММОНИЯ**

Целью исследования явилась разработка эффективных огнезащитных композиционных материалов 1-й группы огнестойкости отечественного производства, способных сохранять свои свойства при температурном воздействии до  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение не менее 150 минут.

Для решения поставленной задачи на первом этапе работы была разработана фосфатная связка на основе аммофоса, представляющего собой смесь дигидрофосфата аммония  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  и гидрофосфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , и продуктов его взаимодействия с тонкодисперсным отработанным периклазохромитовым огнеупором.

Исследована последовательность термохимических превращений в вязнущей системе  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , установлен характер кристаллизационных процессов, лежащие в основе ее твердения. Установлено, что при взаимодействии оксида магния и аммонийфосфатного связующего образуются смешанные магнийфосфатные новообразования, важнейшим из которых является струвит  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Для предотвращения спада прочности магнийаммонийфосфатной цементной матрицы, наблюдаемой при воздействии температурных нагрузок, в состав связующего вводили вермикулит.

На основании поисковых исследований разработано огнезащитное покрытие 1-й группы огнестойкости оптимального состава, изучены показатели его физико-технических и эксплуатационных свойств (таких как адгезия, прочность, водопотребность, водопоглощение, сроки схватывания, морозостость, термоустойчивость и др.). Выведена регрессионная зависимость ( $\sigma(x) = \exp(2,917 - 0,094 \cdot x)$ ), которая математически описывает изменение свойств покрытия от массового или объемного содержания компонентов.

Разработаны теоретические предпосылки для универсализации и автоматизации процесса исследований огнезащитного материала, позволяющие прогнозировать его физико-технические свойства в зависимости от значений определяющих параметров (например, массового или объемного содержания компонентов) в полном диапазоне их изменения.

УДК 666.295

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

### **ДЕКОРАТИВНЫЕ ГЛАЗУРИ КРАКЛЕ ДЛЯ МАЙОЛИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Декоративные глазури кракле применяются в производстве майоликовых изделий с целью получения на их поверхности равномерного цека – микротрещин вследствие большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) керамической основы и глазурного слоя. Это обеспечивает красивую сетку трещин на поверхности глазурного покрытия – эффект кракле. Процесс формирования сборчатых глазурей обусловлен также развитием на их поверхности глубокой, крупной, графически четкой сетки трещин или скатыванием глазури в плотные слои, каплеобразные образования с очень сильными разрывами глазурного слоя.

В качестве основы для получения глазурей кракле в работе применены производственные глазурные покрытия, используемые ОАО «Белхудожкерамика»: прозрачные – № 189 и П2 и глушеная – 5Н.

Эффект кракле обеспечивался введением в состав фритт добавок, значительно изменяющих значения ТКЛР: криолита, кремнефторида натрия, оксидов цинка и свинца, щелочных и щелочно-земельных металлов.

Установлено, что весьма существенную роль для обеспечения эффекта кракле играет перемол глазурной суспензии и повышенное содержание глинистых составляющих в их составах. Остаток на сите 0056 должен составлять не более 0,1 %, или отсутствовать вовсе, а добавка огнеупорной глины составляет до 15–18 мас. %.

В результате исследований синтезированные прозрачные глазурные покрытия с эффектом кракле, значения ТКЛР которых находятся в интервале  $(135–155) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$  при ТКЛР керамической основы  $(50–52) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ . Это обеспечивает получение крупной графически четкой сетки трещин.

Глушеные глазурные покрытия, по типу сборчатых, с декоративным покрытием в виде каплеобразных образований со значительным разрывом глазурного слоя получены на основе фритты 5Н. Значения ТКЛР этих покрытий находятся в интервале  $(35–40) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ .

Оба покрытия формируются при температуре обжига 980–1050°C в электрических камерных печах.

**ПОСУД ДЛЯ СМАЖАННЯ І ПРАЖАННЯ СТРАВАЎ  
У 12-19 СТСТ. У ТРАДЫЦЫЙНАЙ КУЛЬТУРЫ БЕЛАРУСІ  
(ПАВОДЛЕ АРХЕАЛАГІЧНЫХ І ПІСЬМОВЫХ КРЫНІЦ)**

Вядомы два віда начынняў для смажання і пражання страваў гэтага часу: латкі і рынкі (табліца 1).

Існавалі дзве разнавіднасці непаліваных латак: глыбокія, падобныя да місак з загнутымі ўнутр краямі (распаўсюджаны ў Падняпроўі і на Палессі) і плиткія, падобныя да патэльняў авальнай ці круглай формы (бытавалі на Панямонні і ў Цэнтральным рэгіёне). Дыяметр венца першых ў 2–2,5 разы перавышае дыяметр донца, што амаль роўны вышыні пасудзіны, таўшчыня сценак – да 1,2 см. Па форме верхняй часткі яны нагадваюць гаршчок, але з вялікім дыяметрам венца (ад 25 да 35 см). Латкі аздаблялі традыцыйным для пэўнага рэгіёна арнаентам: у Мазыры (12 ст.) гэта пазногцевыя насечкі па плечуку, часам у спалучэнні з паглыбленымі стужкамі, у Панямонні – часцей за ўсё хвалісты арнамент, у Падняпроўі (Магілёў) нават у канцы 17 ст. – пальцавыя зашчыпы. Асабліва папулярнымі былі непаліваныя латкі ў 17–19 стст. у жыхароў усходняй і паўночна-усходняй Беларусі. Першыя паліваныя латкі зафіксаваны ў 17 ст. (г. Магілёў). Масавы ўжытак іх прыпадае пераважна на 18–19 стст. Плиткія непаліваныя латкі 14–15 стст. мелі глыбіню да 4–5 см і полюю ручку, даўжыня якой адпавядае шырыні далоні. Асабліва шмат іх было сабрана падчас раскопак Крэўскага замка. Ручкі да патэлен з Мсціслава дадаткова мацавалася гліняным «зубам». Крычаўскія патэльні звонку аздабляліся хвалістым арнаентам.

Рынкі – гэта начынне піялападобнай формы з дыяметрам венца пераважна 16–20 (не больш за 26) см, прызначанае для смажання страваў на адкрытым вогнішчы. Глыбіня плиткіх рынак амаль не перавышала 5,5 см. Яны мелі 3 ножкі вышыней ад 3,5 да 4,5–5 см канічнай або ўсечанаканічнай формы. Мацаваліся ножкі пераважна пад вуглом 120–135°. Унутраная паверхня рынак пакрывалася зялёнай або карычневай свінцовай палівай. Вышыня ножак з’яўляецца своеасаблівым модулем, які вызначае глыбіню начыння. Даўжыня ўтульчатых ручак 6–7 см, што прыкладна адпавядае шырыні жаночай далоні. Форма іх – ў выглядзе раструба ці з падвойным валікам на канцы. Мацаваліся да злёгка падсушанага вырабу да краю венца або крыху ніжэй. Плиткія рынкі характэрны для слаёў 16–17 стст. замкаў,

мястэчкаў (Гродна, Слонім, Ліда, Гальшаны, Мір, Мсціслаў, Крычаў, Чачэрск, Мазыр, Мінск і інш.), а самая ранняя знаходка з Мірскага замка датуецца канцом 15 ст.

Акрамя плиткіх, сустракаюцца і глыбокія рынкі, якія нагадваюць місы ці макотры на ножках з дыяметрам венца ад 22 да 34 см і вышыней ножак і глыбіней начыння ад 10 да 12 см, што маюць 2 петлепадобныя сіметрычныя ручкі-вуха (авальныя, стужкападобныя ці рабрыстыя ў сячэнні). Донцы – пераважна акруглыя, але ёсць і з пляскатым донцам (Гальшанскі замак, Мсціслаў). Глыбокія рынкі – начынні для пражання ежы. Гэтай функцыі адпавядае яе глыбіня (10 і больш см) і аб’ём (каля 3 літраў). Ножкі па форме маглi нагадваць звярыныя лапы. Знаходкі рынак адзначаны сярод матэрыялаў сярэдзіны – другой паловы XVII ст. ў Мірскім, Лідскім замках, у гарадах Мсціславе, Крычаве, Ляхавічах, Мінску.

**Табліца 1 – Формы начынняў для смажання і пражання страваў**

Латка	Рынка плиткая	Рынка глыбокая	Рынка глыбокая
			

Тэрмін “латка” сустракаецца ў слоўніках 19 ст. (у І.Насовіча, А.Дэмбавецкага), прычым назвы “латка” і “міска” ставяцца побач.

У нашых пісьмовых крыніцах посуд з назваю “рынка” сустракаецца ў дакументах XVII ст. Прыкладам, Уладзіслаў IV у 1641 г. выдае прывілей на стварэнне цэха ганчарам, печнікам, мулярам і цагельнікам у г. Полацку. Прышлы майстар, каб пацвердзіць сваё званне, павінен быў зрабіць “гаршчок на 3 пядзі або на далонь, збан такой жа велічыні, даёнку ў карэц, рынку ў чвэрць і міску ў чвэрць”. Пры апісанні падрыхтоўкі банкета ў магілёўскай ратушы ў 1688 г. сярод набытых пасудзін пералічваюць “рынек три до кухни”.

Мяркуючы па этнаграфічных дадзеных, на большасці тэрыторыі Беларусі выраб рынак спыніўся менавіта ў XVIII ст. (што звязана са зменай канструкцыі печы), аднак у канцы XIX – пачатку XX ст. рынкі рабіліся ганчарамі з Гарадной і Пружан, а майстры з Поразава прадавалі іх аж да сярэдзіны XX ст. Археалагічныя матэрыялы паказваюць, што суадносіны ў колькасці латак і рынак розныя ў кожным з рэгіёнаў, што тлумачыцца прынцыпам функцыянальнай аналогіі (латак і глыбокіх рынак, плиткіх рынак і патэльняў з ручкаю).

## **АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ВЫХЛОПНОЙ ТРУБЕ ЦИКЛОНА**

Циклоны широко используются в промышленности для улавливания взвешенных частиц из газов. Основными параметрами, характеризующими работу циклона, являются эффективность очистки и гидравлическое сопротивление (потери давления), определяющее энергозатраты на проведение процесса.

Целью данной работы являлось оценить потери давления в выхлопной трубе циклона.

Анализ потерь давления осуществлялся с помощью коммерческого пакета вычислительной гидродинамики CFX. Движение сплошной фазы (т.е. воздуха) описывалось уравнениями Навье-Стокса для ньютоновской несжимаемой изотермической жидкости. Для решения данных уравнений использовалась осредненная по Рейнольдсу модель напряжений, предложенная Специале, Саркарком и Гатским.

Удлинение выхлопной трубы не оказывает практически никакого влияния ни на потери в выхлопной трубе, ни на общие потери давления в циклоне. Результаты также показали, потери давления вдоль выхлопной трубы для 4 различных длин труб могут быть описаны общей кривой, которую условно можно разделить на 3 зоны:

- начальная (входная) зона длиной порядка полдиаметра выхлопной трубы, которая практически не зависит от относительной длины выхлопной трубы. Потери давления на этом участке достигают 12.5-13%. Эта зона характеризует потери давления, обусловленные в первую очередь входом потока в выхлопную трубу и стабилизацией потока;

- средняя зона характеризуется постоянными потерями давления, равными 4,35% на длину трубы, равную диаметру;

- основная часть давления (до 80%) теряется на выходном участке выхлопной трубы и чем короче выхлопная труба, тем больше длина этой зоны. Большие потери давления на выходе из циклона обусловлены обратным потоком. Длина этой зоны зависит от длины средней зоны. Отсутствие зоны С возможно если длина выхлопной трубы будет более 20 диаметров.

Таким образом можно сделать вывод, что потери давления в выхлопной трубе циклонов составляют значительную часть, более 43% для циклонов ЦН-11. Регенерация этих потерь давления позволит существенно снизить общее сопротивление циклона.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСКРУЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ВЫХЛОПНОЙ ТРУБЕ ЦИКЛОНА**

Поскольку поток в выхлопной сильно закручен, значительная часть давления теряется в виде кинетической энергии вращательного движения вихревого потока. Эти потери можно регенерировать, преобразовав кинетическую энергию вращательного движения вихревого потока в потенциальную энергию статического давления, т.е. преобразовав вихревое движение в осевое. Это осуществляется с помощью раскручивающего устройства (регенератора давления).

Целью данной работы являлось оптимизация четырех основных геометрических параметров разработанного ранее раскручивающего устройства: диаметра сердечника, числа, высоты и угла наклона передней кромки лопастей. Оптимизация одного параметра при постоянных других параметрах может не выявить все взаимосвязи между параметрами, поэтому в данном случае использовалось суррогатная оптимизация.

Оптимизация проводилась для двух целевых функций отдельно: минимальные потери в выхлопной трубе и минимальные общие потери давления в циклоне.

С помощью планирования эксперимента были получены 70 вариантов. Диаметр сердечника изменялся от 0.4 до 0.8 диаметров выхлопной трубы, число лопастей от 1 до 9, высота лопастей от 0.4 до 2.0 диаметров выхлопной трубы и угол наклона передней кромки лопастей 10-50 градусов.

Полученные с помощью вычислительной гидродинамики коэффициенты снижения потерь давления в выхлопной трубе и в циклоне были использованы как исходные данные в коде суррогатной оптимизации, основанной на математической модели искусственной нейронной сети на основе радиальных базисных функций. На основании данного кода были получены оптимальные геометрические параметры раскручивающего устройства. Дальнейшей задачей являлось оптимизация формы сердечника. Была получена и исследована конструкция раскручивающего устройства с эллипсоидной формой сердечника.

Применение оптимизированного раскручивающего устройства снижает потери давления в выхлопной трубе на 73,7%, что приводит к снижению общих потерь давления в циклоне практически на треть не ухудшая эффективность очистки.



УДК 621.926

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

### **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОБКАТКИ ПОМОЛЬНЫХ БАРАБАНОВ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА РАЗРУШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ**

Планетарные мельницы относятся к мельницам барабанного типа и являются высокоэффективными измельчающими агрегатами. При измельчении в них материала на него действуют три разрушающих воздействия: раздавливание, истирание и удар. Влияние каждого из указанных способов воздействия на эффективность измельчения оценивалось только косвенно, без расчета разрушающих напряжений. В связи с этим целью данной работы является количественная оценка разрушающего воздействия мелющих тел на измельчаемый материал.

В качестве объекта для аналитических исследований выбрана горизонтальная планетарная мельница. Как и в большинстве исследованных ранее вариантов конструкций, радиус барабана принят  $r = 0,1$  м, геометрический критерий  $k = r/R = 0,5$ , степень загрузки 50%. Поскольку экспериментальные исследования показали, что наибольшая эффективность достигается при центрифугальном режиме движения загрузки, то анализу подвергался только этот режим.

Ввиду того, что разрушающие напряжения в планетарной мельнице ранее не рассчитывались, принято решение по возможности установить их максимальные значения в характерных точках сегмента загрузки. Руководствуясь принципом достижения максимальных напряжений, в качестве основного технологического параметра принята максимальная угловая скорость барабана  $\omega = 180$  рад/с. С целью сравнения расчеты проводились и для угловой скорости  $\omega = 90$  рад/с. Диаметр мелющих стальных тел принят  $d = 18,5$  мм, частиц измельчаемого материала – 1 мм.

Полученные результаты можно считать начальным этапом в изучении разрушающего воздействия мелющих тел в планетарной мельнице. Вывод о преимуществах какого-то способа воздействия с точки зрения эффективности измельчения пока делать рано, несмотря на то, что сжимающие напряжения значительно ниже ударных и истирающих, цикличность их изменения существенно выше.

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

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА ИЗНОС РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РОТОРА**

Основной проблемой при эксплуатации дробилок и мельниц ударного действия является высокий абразивный износ рабочих органов, особенно в быстроходных машинах. На интенсивность износа влияют прежде всего форма и расположение разгонных лопастей ротора-ускорителя и частота вращения ротора. Целью данного исследования являлось составление методики количественной оценки абразивного износа лопастей и апробация этой методики.

Для моделирования процесса абразивного воздействия частицы материала на лопасть была выбрана истирающая модель Ходакова. В соответствии с ней одиночное зерно абразива при движении вдоль поверхности срезает слой материала, в поперечном сечении представляющий собой сегмент окружности.

В качестве параметра, характеризующего износ, используется объёмная интенсивность изнашивания. Для ее определения, помимо геометрических параметров выбранной модели и прочностных параметров материала лопасти, требуется сила давления на лопасть со стороны частицы. Для ее определения, в свою очередь, необходимо знать относительную и переносную скорости движения частицы вдоль лопасти в выбранной цилиндрической системе координат. Эта задача была решена ранее [1].

Результаты расчетов относительной скорости, силы давления и объёмной интенсивности изнашивания для трех вариантов конструкции ротора с прямыми лопатками представлены графически. Они хорошо соотносятся с данными экспериментальных исследований, подтверждают адекватность физической модели и показывают, что наибольшие значения силы давления соответствуют ротору с лопастями, повернутыми вперед по ходу вращения ротора. В исследуемом диапазоне величина интенсивности износа повышается с увеличением угловой скорости, но это повышение незначительно.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вайтехович, П.Е. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Труды БГТУ. 2014. №3: Химия и технология неорган. в-в. – С. 102–104.

## САМОФУТЕРОВКА ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Процессы измельчения сопровождаются интенсивным износом рабочих органов измельчающих машин. Особенно высоким износом отличаются высокоскоростные агрегаты ударного действия, к которым относятся и ударно-центробежные мельницы.

Этот агрегат представляет собой вращающийся ротор-ускоритель с лопастями, на выходе из которого измельчаемые частицы ударяются об отбойные элементы. Наиболее изнашиваемыми узлами являются именно они и лопасти ротора. Причем неравномерный износ лопастей приводит к нарушению работы всего агрегата. По этой причине его предотвращение представляется весьма актуальной задачей.

Одним из простых и надежных методов решения этой задачи является самофутеровка, когда на лопасти обеспечивается залегание некоторой части материала, и движущийся материал скользит по образовавшемуся слою, а не по металлической поверхности. Это достижимо при выполнении лопастей изогнутыми, например, по логарифмической спирали.

В данной работе предложен алгоритм расчёта кривизны лопасти, при которой обеспечивается самофутеровка. Он основан на том, что для удержания частиц на поверхности лопасти сила трения должна превышать тангенциальную силу. Определяющее влияние на величину силовых факторов при движении по вращающему ротору оказывают инерционные силы. Для их расчета записано уравнение относительного движения измельчаемого материала, причем только для одной радиальной координаты, поскольку угловая связана с ней профилем лопасти. В итоге условие залегания частиц на лопасти представлено в виде:

$$r \geq \frac{\omega r \ln a (\ln a - f)}{2f (\ln^2 a + 1)};$$

Изменяя кривизну лопасти  $a$  и текущий радиус  $r$  с определенным шагом, в каждой точке проверялось выполнение приведенного выше условия. Точка, характеризующая равенством левой и правой частей, являлась граничной для слоя самофутеровки. По этим точкам можно построить для любой угловой скорости  $\omega$  линию, ограничивающую толщину слоя залегания.

УДК 536.25

А. Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук; Г. С. Сидорик, асп.  
(БГТУ, г. Минск)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНЫХ ПУЧКОВ РЕБРИСТЫХ ТРУБ

Интерес к смешанно-конвективной теплоотдаче возник сравнительно недавно ввиду усиленного внимания к проблемам ресурсо- и энергосбережения. Областью применения этих процессов являются химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия, компрессорные станции с трубопроводами, электростанции, системы охлаждения оборотной воды в установках для кондиционирования, пищевая промышленность и т. д. [1]. Обширная область применения смешанной конвекции актуализирует исследования по теплоотдаче и аэродинамике трубных пучков при малых скоростях воздуха.

Для изучения смешанно-конвективной теплоотдачи был создан экспериментальный стенд [2], позволяющий проводить исследования по теплоотдаче и аэродинамике пучков при малых числах Рейнольдса.

Исследовался однорядный пучок, состоящий из шести биметаллических ребристых труб, с различными поперечными шагами их установки. Для создания смешанно-конвективного течения воздуха над экспериментальным пучком устанавливалась вытяжная шахта [2].

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче однорядного горизонтального пучка при различных поперечных шагах установки труб и при различных площадях выходных отверстий вытяжной шахты была получена формула

$$Nu = 0,000202Gr^{0,48} \left( \frac{d_0}{d_3} \right)^{1,28} \left( \frac{H + d_0}{d_3} \right)^{0,35} \left( \frac{f_{отв}}{f_{сж}} \right)^{0,51},$$

где  $d_0$  – диаметр трубы, м;  $H$  – высота вытяжной шахты, м;  $f_{отв}$  – площадь выходного отверстия вытяжной шахты, м<sup>2</sup>;  $f_{сж}$  – площадь сжатого сечения пучка, м<sup>2</sup>;  $d_3$  – эквивалентный диаметр поперечного сечения пучка, м.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
2. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из ребренных труб при смешанной конвекции воздуха и выбор формы представления результатов // Энергетика. Изв. высш. уч. зав. и энерг. объед. СНГ. Т.60, №4 (2017). С. 352–366.

УДК 536.24

В. Б. Кунтыш, проф., д-р. техн. наук;  
 А. Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук;  
 Г. С. Сидорик, асп.; В. Н. Фарафонов, доц., канд. техн. наук;  
 В. В. Дударев, доц., канд. техн. наук  
 (БГТУ, г. Минск)

**ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
 ШАХМАТНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТРУБ С НАКАТНЫМИ  
 АЛЮМИНИЕВЫМИ РЕБРАМИ ГРУППЫ  
 КОМПАНИИ «ЦНО-ХИММАШ»**

Выполнено экспериментальное исследование шахматных шестирядных пучков в поперечном потоке воздуха из биметаллических труб со спиральными накатными алюминиевыми ребрами, которые изготавливаются группой компании ООО «ЦНО-ХИММАШ» для аппаратов воздушного охлаждения нефтегазового комплекса России. Параметры оребрения, мм: наружный диаметр ребра  $d = 56$ ; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно  $h = 14,6$ ;  $s = 2,5$ ;  $\Delta = 0,5$ ; диаметр у основания ребра  $d_0 = d - 2h = 26,8$ . Несущая труба выполнена из стали Ст.10. Наружный диаметр трубы  $d_n = 25$  мм при толщине стенки 2 мм. Коэффициент оребрения трубы  $\phi = 19,26$ .

Известные теплоаэродинамические исследования пучков из труб с поперечными ребрами, осуществленные В. Ф. Юдиным, В. Б. Кунтышем, А. А. Жукаускасом с сотрудниками, Е. Н. Письменным не охватывают пучки с тесными шагами, значения которых отличаются небольшими пошаговыми отношениями между собой. Но такие компоновки перспективны для теплообменных секций АВО, в частности для аппаратов охлаждения природного газа. Они относятся к группе компоновок, обладающих энерго- и ресурсосбережением.

Опытами охвачены базовая равносторонняя компоновка с поперечным шагом  $S_1 = S_2' = 64$  мм и продольным шагом  $S_2 = 0,866 \cdot 64 = 55,4$  мм, а также равнобедренные компоновки, для которых  $S_1 = 68$  мм,  $S_2 = 55,4$  мм и  $S_1 = 68$  мм,  $S_2 = 50$  мм, которые целесообразно применять в АВО третьего поколения [1], здесь  $S_2'$  – диагональный шаг.

Изучалась приведенная теплоотдача локальным тепловым моделированием с помощью электрокалориметра. Исследованы изменение теплоотдачи по рядам пучка от 1-го до 6-го, по данным которых осуществлено усреднение теплоотдачи на весь пучок; аэродинамическое сопротивление пучков; термическое контактное сопротивление (ТКС) трубы.

Опытные данные обработаны в числах подобия:

$$Nu_i = \frac{\alpha_i d_0}{\lambda}, Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}, Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}, Re = \frac{w d_0}{\nu}$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи  $i$ -го ряда пучка, Вт / (м<sup>2</sup>К);  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи пучка, Вт / (м<sup>2</sup>К);  $\Delta P$  – перепад статического давления, Па;  $w$  – скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка, м/с.

Физические константы воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  принимались по его средней температуре.

Скорость воздуха изменялась в диапазоне от 2 до 10 м/с, а число Рейнольдса – от 3000 до 18000.

Опытные данные обобщены уравнениями подобия вида:

$$Nu_i = f(Re),$$

$$Nu = f(Re),$$

$$Eu = f(Re).$$

Значения ТКС для исследованной трубы составило 0,000212 м·К/Вт.

Усилие выпрессовки несущей трубы из оребренного образца длиной 100 мм составило 1400 кг, что свидетельствует о надежности механического соединения ребристой оболочки с несущей трубой и удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51364-99.

Для опытов применена аэродинамическая труба разомкнутого типа [2], с поперечным сечением канала для прохода воздуха 300×300 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кунтыш В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
2. Кунтыш В. Б. Результаты исследования тепловых характеристик воздухонагревателя из биметаллических ребристых труб / В. Б. Кунтыш, В. В. Дударев, А. Б. Сухоцкий, В. И. Володин // Энергетика. Изв. высш. уч. зав. и энерг. объедин. СНГ. №1, 2014. С. 48–56.

УДК 621.926; 66.065

И. А. Левданский, асп.; Э. И. Левданский, проф., д-р техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **СРЫВ ВЛАГИ С ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ВИХРЕВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА В ПЕРФОРИРОВАННОМ ЦИЛИНДРЕ.**

Согласно нашим исследованиям, и данным других исследователей свободная влага, находящаяся на поверхности крупнодисперсных твердых частиц, может быть удалена за счет обдува их высокоскоростным газовым потоком. Естественно частицы при обдуве не должны приобретать высокой скорости, а еще лучше если их скорость будет близка к нулевой. Несколько другой подход к созданию большой разности скоростей частиц и газа после их взаимодействие предложен нами в патенте РБ №20508. В предлагаемом способе взаимодействие влажных частиц с газовым потоком осуществляется в перфорированном цилиндрическом элементе. При этом влажный материал подается сверху в центр элемента, газовый поток также так же сверху через боковой тангенциальный патрубков. За счет вихревого движения газового потока частицы приобретают вращательное движение и скорость их вращения измеряется тысячами оборотов в минуту. Такие результаты подтверждены многочисленными исследованиями других исследователей. При достижении определенной скорости вращения свободная влага будет срываться и самостоятельно уноситься вместе с газовым потоком. Начало срыва, а также количество срываемой влаги в зависимости от скорости вращения частиц можно определить математическими расчетами.

При движении частиц в вихревом потоке от центра элемента к стенке наблюдается непрерывное их соударение между собой. При соударении частиц также будет осуществляться срыв свободной влаги с поверхности частиц. Следовательно, в расчетах необходимо учесть удаление и этой влаги с поверхности частиц.

Двигаясь от центра к перфорированной стенке частицы материала достигают высоких скоростей и ударяются о нее. За счет удара влага также будет срываться с поверхности частиц. Удаленная влага через отверстия перфорации будет удаляться из рабочего элемента аппарата, а частицы материала будут скачками двигаться по перфорированной обечайке вниз, где и будут выводиться из установки. При скачкообразном движении вниз по перфорированной обечайке будет происходить обтирание частиц, что так же снизит их влажность. Таким образом, чтобы полностью рассчитать влажность материала после вихревого воздействия потоком воздуха необходимо учесть последовательно все факты.

УДК 536.24

В. В. Дударев, доц., канд. техн. наук;  
В. Н. Фарафонов, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ВНЕШНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ**

Газо-жидкостные теплообменные аппараты широко используются в различных отраслях промышленности и komponуются, как правило, из оребренных труб. При эксплуатации таких аппаратов в межреберном пространстве труб происходит отложение загрязнения, которое уменьшает площадь оребренной поверхности и создает дополнительное термическое сопротивление, что в целом ухудшает теплопередачу между жидкостью и газом. Поэтому выбор или проектирование подобных аппаратов необходимо вести с учетом возможного влияния загрязнения на теплопередачу, что невозможно без предварительного расчета термического сопротивления загрязнения. Отсутствие необходимой информации по данному вопросу в научно-технической литературе создает определенную сложность для специалистов.

Для ликвидации данного пробела в работе осуществлено дальнейшее развитие ранее полученного решения двумерной стационарной задачи теплопроводности для короткого цилиндрического слоя загрязнения, имеющего свободную внешнюю поверхность и контакт по торцам и внутренней поверхности с оребрением трубы [1]. В результате сформулированы зависимости, описывающие распределение плотности тепловых потоков в слое загрязнения. Получены решения для расчета средних значений плотностей потоков на границах слоя.

Для биметаллической ребристой трубы, изготавливаемой в промышленных объемах, со стальной несущей трубой и алюминиевыми ребрами с коэффициентом оребрения  $\varphi_0 = 16,8$  и размерами:  $d_0 \times d_1 \times d_p \times \Delta \times s \times h = 26,5 \times 21 \times 25 \times 0,75 \times 2,91 \times 14,55$  проведено исследование характера распределения тепловых потоков в слое загрязнения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Методика расчета и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением/ В. В. Дударев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, №3. – С. 237–255.



УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский, д-р техн. наук, проф.;  
Н.Н. Матарас, магистрант (БГТУ, г. Минск);  
А. Г. Трифонов, д-р техн. наук, зам. генерального директора;  
Л. С. Кулик, научный сотрудник  
(ОИЭЯИ - Сосны НАН Беларуси, г. Минск)

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В КОНТУРЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА АЭС**

В данной работе рассмотрена проблема обеспечения динамической устойчивости работы контура охлаждения системы аварийного отвода тепла АЭС от парогенераторов (СПОТ ПГ).

Факторами динамической неустойчивости работы контура охлаждения могут являться: кризис кипения второго рода в парогенераторе, связанный с периодическим разрывом поверхностной пленки и локальным перегревом поверхности теплообмена; кризис кипения первого рода в баке аварийного отвода тепла, связанный с кризисом отвода тепла в бак от теплопередающей поверхности теплообменника аварийного расхолаживания; неустойчивый процесс пленочной конденсации в трубных пучках теплообменника аварийного расхолаживания, связанный с термодинамическими и геометрическими параметрами самого теплообменника.

Кризис кипения второго рода может приводить к пульсациям массовой скорости пара на входе в теплообменник-конденсатор и, в свою очередь, может «спровоцировать» рост амплитуды волновых процессов на поверхности пленки с переходом в неустойчивый режим работы всего контура охлаждения СПОТ ПГ. Вместе с тем, следует указать, что в рассматриваемой конструкции вероятность проявления неустойчивости режимных параметров на входе в теплообменник аварийного расхолаживания вследствие неустойчивости работы парогенератора относительно невелика и, в первую очередь, это связано с эффектом «демпфирования» парогенератора наличием перепада давления по тракту «теплообменник аварийного расхолаживания – бак аварийного отвода тепла».

Кризис кипения первого рода в баке аварийного отвода тепла может приводить только к кратковременным (в начальные моменты аварийного сброса) воздействиям на процесс конденсации в теплообменнике аварийного расхолаживания, так как достаточно быстро происходит перестройка барботажной структуры в баке аварийного отвода тепла с переходом в подъемном движении от одиночных пузырей к движению в цепочках.

В данной работе анализ динамической устойчивости контура охлаждения СПОТ ПГ проводился с использованием представленных в [1,2] рекомендаций на основе значений размерного волнового числа, длины волны и касательного напряжения на поверхности пленки, критерия устойчивости Кутателадзе, а также параметра, определяющего интенсивность фазового перехода в рассматриваемых условиях.

Характерные для условий работы СПОТ ПГ значения указанных параметров получены в рамках вычислительных экспериментов с использованием базового многомерного вычислительного шаблона описания процесса пленочной конденсации в системе вертикальных каналов [3].

Сравнительный анализ параметров динамической устойчивости для режимных условий работы теплообменника-конденсатора и представленных в работе [1] границ неустойчивости показывает, что расчетные размерные волновые числа имеют значительно большие значения в рассматриваемых условиях, чем их граничные значения. Это позволяет сделать предварительный вывод об устойчивости волновой структуры и, соответственно, процесса конденсации пара в теплообменнике-конденсаторе СПОТ ПГ АЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Актершев, С.П. Устойчивость, нелинейные волны и процессы переноса в пленках жидкости при сложных условиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 01.02.05. – Новосибирск, 2016. – 35 с.

2 Ключев, Н.И. Волновое течение пленки по стенке вертикального цилиндрического канала / Н.И. Ключев, Е.А. Соловьева // Вестник СамГУ, 2009. – № 4. Естественнонаучная серия. – С. 114–128.

3 Андрижиевский, А.А. Моделирование структуры парожидкостного потока при конденсации пара в системе пассивного отвода тепла АЭС / А.А. Андрижиевский, А.Г. Трифонов, Л.С. Карпович // Труды БГТУ. №2 (199) Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 2017. – С. 183–189.

УДК 621.926

Г.М. Хвесько, доц., канд. техн. наук;

П.Е. Вайтехович, доц., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### МОЩНОСТЬ ПРИВОДА ЗАГЛАЖИВАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ДИСКОВЫМ ПЛАНЕТАРНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ В УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

В работающей заглаживающей машине потребляемая мощность расходуется в основном на преодоление сил трения, возникающих при движении диска по незатвердевшей бетонной поверхности. Рабочий орган машины рассматриваемой конструкции - диск участвует во вращении вокруг собственной оси, в планетарном движении вместе с водилом вокруг центральной оси и в поступательном движении заглаживающей машины относительно поверхности изделия. Поэтому вычисляют мощность для каждого из перечисленных движений.

$$N = N_{ep} + N_{nl} + N_{пост}$$

Мощность, необходимая на преодоление сил трения диска в собственном вращательном движении, равна  $N_{ep} = \frac{2}{3} fpk\omega\pi r^3$ . Мощность, затрачиваемая на планетарное движение диска вокруг оси О, состоит из двух частей:  $N_1$  - мощности силы трения при движении диска со скоростью центра диска А и  $N_2$  - мощности момента сил трения диска относительно точки А при повороте диска в планетарном движении вместе с водилом вокруг оси О.

$$N_1 = fp\pi r^2 \cdot \omega R_1 (k+1),$$

$$N_2 = \frac{2}{3} fp\pi r^3 \omega.$$

Скорость поступательного движения заглаживающей машины принимается как часть от скорости точки на ободу диска во вращательном движении вокруг оси А.

$$V_{пост} = k_v V_{ep} = k_v \omega_{ep} r = k_v \omega k r, \text{ где } k_v \leq 0,1.$$

Мощность, затрачиваемая на поступательное движение диска

$$N_{пост} = fp\pi r^2 \cdot k_v \omega k r = fp\pi r^3 k_v \omega k.$$

Суммарная мощность рабочего органа заглаживающей машины равна

$$N = \frac{2}{3} fpk\omega\pi r^3 + fp\pi r^2 \omega R_1 (k+1) + \frac{2}{3} fp\pi r^3 \omega + fp\pi r^3 k_v \omega k.$$

Полученная зависимость линейна по отношению к переменным параметрам  $f, p, k, \omega$  и является нелинейной функцией от  $r$ . Коррекцию потребляемой мощности можно осуществлять за счет изменения параметров планетарного движения рабочего органа и диаметра диска.

УДК 621.561

С. В. Здитовецкая, ассист., канд. техн. наук;

В. И. Володин, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛЫЙ ПОЛ**

Тепловые насосы (ТН) получили широкое распространение в низкотемпературных системах отопления и горячего водоснабжения, к которым относится система напольного отопления.

Согласно [1, 2] максимальная температура теплоносителя в контуре должна быть не более 55°C. При использовании в качестве источника тепла ТН в контур подается вода с температурой 40°C. Температурный перепад между подающим и обратным потоком воды не должен превышать 5–15°C. Средняя температура поверхности пола с учетом требований [1] для полов помещений с постоянным пребыванием людей принимается не выше 29°C. Гидравлическое сопротивление греющего контура должно быть не более 20 кПа [2].

Ограничивающим фактором использования воздушных ТН при низких температурах атмосферного воздуха является их невысокая энергетическая эффективность (коэффициент преобразования ниже 2,5). Поэтому используются бивалентные системы теплоснабжения, которые имеют резервный источник теплоты. Его использование предполагается, когда температура атмосферного воздуха опускается ниже бивалентной температуры, при которой эффективность использования резервного источника становится выше по сравнению с ТН.

Таким образом, при значениях коэффициента преобразования ниже 2,5 использование воздушных ТН требует применения дополнительного источника тепла. Однако, если учитывать значения среднесезонного коэффициента преобразования, то использование воздушных ТН для нужд теплоснабжения является целесообразным и конкурентноспособным.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Строительные нормы: СТБ 4.02.01-03. – Введ. 30.12.03 (с отменой на территории РБ СНиП 2.04.05-91). – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 79 с.

2. Проектирование и устройство систем отопления из полимерных труб. Пособие к строительным нормам: П1-03 к СНБ 4.02.01-03. – Введ. 30.12.03. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 80 с.

В. И. Володин, проф., д-р техн. наук;  
А. Е. Костеневич, магистрант (БГТУ, г. Минск)

## ТЕПЛОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЕЙ АЭРОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Одним из наиболее оптимальных решений, направленных на снижение энергозатрат в системах теплоснабжения и учитывающих экологический аспект, является использование тепловых насосов, получивших широкое распространение в высокотехнологичных странах мира. Наибольшим спросом пользуются тепловые насосы, использующие атмосферный воздух в качестве источника низкопотенциальной теплоты. Такие устройства являются перспективными и для Беларуси.

Объектом исследования является испаритель аэротермального теплового насоса, работа которого влияет на эффективность всей системы трансформации теплоты. Поверхность теплообмена испарителя состоит из биметаллических ребристых труб с винтовыми однозаходными ребрами, расположенных горизонтально в шахматном порядке и объединенных в змеевики. Схема течения потоков воздуха и хладагента – перекрестный ток с противотоком.

Численный анализ работы испарителя проводился с использованием разработанного интегрального метода теплогидравлического расчета. На основе предварительного сравнительного анализа в качестве основных зависимостей для расчета теплоотдачи и сопротивления со стороны воздуха приняты данные ЦКТИ. В результате анализа данных Чена, Кандликера и Института теплофизики СО РАН со стороны хладагента для расчета теплоотдачи принят метод Чена [1], при определении сопротивления трения используется гомогенная модель, а для расчета местных сопротивлений аппроксимация метода ЦКТИ.

Поверхность теплообмена состоит из внутренней стальной трубы  $12 \times 1$  мм и наружной алюминиевой трубы, несущую ребра,  $15 \times 1,5$  мм. Ребра имеют высоту 8,5 мм, толщину – 1,3 мм. Базовая поверхность теплообмена берется с увеличенным шагом ребер  $t = 10$  мм и коэффициентом оребрения  $\phi = 3,81$  из-за возможного инееобразования в холодное время года. В пучке трубы расположены с поперечным шагом 38 мм и продольным шагом 27,5 мм. Общее количество труб в испарителе 96, число рядов труб по ходу воздуха 8, число труб в одном ряду 12. Режимные параметры работы испарителя: тепловой поток 10 кВт; массовый расход хладагента 0,068 кг/с и температура его кипения  $-20^\circ\text{C}$ , начальное паросодержание составляло 0,33; тем-

пература воздуха на входе в испаритель принята равной  $-10^{\circ}\text{C}$ , скорость воздуха – 3 м/с. В качестве основного брался хладагент R22. В процессе численного анализа определялась длина ребристых труб в пучке. Предельное значение потери давления в испарителе со стороны хладагента составляло 50 кПа.

Определяющее влияние на тепловую эффективность аппарата оказывает теплоотдача со стороны воздуха. Сравнительный анализ показал, что при изменении коэффициента теплоотдачи со стороны хладагента с 2899 до 1131 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), коэффициент теплопередачи изменяется с 354 до 297 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), т. е. уменьшение коэффициента теплоотдачи при кипении в 2,56 раза приводит к снижению коэффициента теплопередачи лишь в 1,19 раз. Такая же тенденция характерна для изменения габаритов испарителя.

Установка системы автоматического оттаивания инея позволяет уменьшить шаг оребрения и получить более компактную конструкцию испарителя. Уменьшение шага ребер с 10 до 3 мм приводит к увеличению коэффициента оребрения с 3,81 до 10,4, приведенного коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха с 317 до 968 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), а коэффициента теплопередачи с 297 до 513 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), что позволяет уменьшить габариты испарителя в 1,42 раза.

Энергетические показатели тепловых насосов существенно зависят от термодинамических и теплофизических свойств используемых рабочих веществ, которые непосредственно влияют на эксплуатационные и конструктивные характеристики. Сравнение испарителей с хладагентами – R22, R134a и R410A – показало, что худшие характеристики соответствуют хладагенту R134a с потерей давления 38,8 кПа, температурой хладагента на выходе  $-28,8^{\circ}\text{C}$  и наименьшим значением коэффициента преобразования теплового насоса. Данные характеристик испарителя с хладагентом R410A соответственно равны 16,1 кПа и  $-21,1^{\circ}\text{C}$  и не уступают испарителю с хладагентом R22 при прочих равных условиях. Хладагент R410A можно рекомендовать в качестве замены для хладагента R22.

Таким образом, определяющим фактором, влияющим на тепловую эффективность испарителя, является интенсивность теплоотдачи со стороны воздуха и рабочее вещество. Параметры испарителя зависят от эксплуатационных режимов, что требует их увязки с работой теплового насоса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Теплопередача в двухфазном потоке / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

**ПАРАМЕТРЫ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ  
ВВОДЕ ПОТОКА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ**

Рассмотрено воздействие потока среды на начальный участок плоской лопасти, наклоненной под углом  $\beta$  к направлению, обратному ее окружной скорости. Поток среды направлен под углом  $-\alpha$  к указанному направлению.

Скорость потока среды разделена на тангенциальную и осевую составляющие. Для каждого направления отдельно рассмотрены силы воздействия среды на элементарный участок лопасти, в результате анализа которых выведены формулы для определения скоростей движения среды в тангенциальном, осевом направлениях и вдоль лопасти, а также скорости движения под действием центробежной силы и окружной скорости движения лопасти турбины. Определены зависимости для расчета давления, создаваемого средой в тангенциальном и осевом направлениях, а также давления, создаваемого центробежной силой.

Геометрически сложением соответствующих величин выведены обобщенные зависимости для расчета скоростей движения среды и лопасти в указанных выше направлениях и давления среды на лопасть. Получены также выражения для определения скорости движения среды под действием центробежной силы и давления, создаваемого ею. Перечисленные формулы выведены в зависимости от угла наклона лопастей, величины и направления движения среды, а также от окружной скорости турбины.

Максимальное отношение скорости движения среды в межлопастном пространстве к скорости исходного потока наблюдается при направлении движения потока, перпендикулярном плоскости лопасти. Наибольшая скорость движения среды в осевом направлении, определяющая расход среды через турбину, отмечена при  $\beta = (90 + |\alpha|)/2$ . Угол  $\alpha$  в одинаковой мере влияет на зависимости скоростей движения среды в тангенциальном, осевом направлениях и окружной скорости лопастей. Увеличение угла  $\alpha$  от нуля до значения  $|\alpha| = 90 + \beta/2$  способствует повышению тангенциальной скорости среды, но окружная скорость турбины при этом снижается. По мере роста  $\alpha$  давление среды на лопасти повышаются при  $\beta < 45^\circ$  и снижаются при больших углах  $\beta$ .

На основе выведенных формул построены соответствующие графические зависимости.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ  
РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ С ОДИНАКОВЫМИ  
УГЛАМИ НАКЛОНА ЛОПАСТЕЙ**

Давление лопастного колеса, рассчитанное по схеме бесконечного числа лопастей, не совпадает достаточно точно с опытным значением теоретического давления. Различие между этими давлениями может быть учтено специальными поправками Пфлейдерера или Стодолы на несоответствие расчетной схемы реальным условиям. В этих поправках учитывают только количество лопастей и их угол наклона, а также отношение внутреннего и наружного диаметра лопастей в первой и отношение окружных скоростей колеса и среды во второй. Вместе с тем радиальные вентиляторы различаются не только перечисленными параметрами, но и другими конструктивными особенностями, а также геометрией входной и выходной частей. Поэтому использование поправок Пфлейдерера и Стодолы приводит к существенным отклонениям расчетных давлений от опытных величин.

При расчетах потерь давления в технологических трубопроводах и оборудовании, в частности, циклонах широко используется коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$ . В настоящей работе предлагается использование коэффициента сопротивления для расчета потерь давления при прохождении воздухом или газом через радиальный вентилятор.

Расчеты были выполнены для четырех вентиляторов ЦАГИ № 3,15 – № 10, каждый из которых имеет постоянный угол наклона лопастей. Расчетное давление определяли как сумму динамического, статического давлений и давления, создаваемого центробежной силой, по формулам, выведенным в [1], опытные данные взяты из справочника [2]. В результате расчетов выведены следующие значения коэффициентов сопротивления вентиляторов: Ц 3-81 – 0,94, Ц 5-31 – 0,54, Ц 5-36 – 0,52, Ц 6-12 – 0,28. Расчеты показали, что коэффициент сопротивления для различных типов вентиляторов имеет разные значения, но для одного и того же типа вентилятора он постоянный.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Павлечко, В.Н. К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя / В.Н.Павлечко, С.К.Протасов // ИФЖ. 2014. Том 87, № 6. С. 1448–1454.
2. Соломахова, Т.С. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник / Т.С.Соломахова, К.В.Чебышева. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 60–107.



УДК 629.712

В.С. Францкевич, доц., канд. техн. наук;  
В.Н. Павлечко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
Е.О. Ильяшенко (ОАО «Крион»)

## **ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО КИСЛОРОДА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА**

Как известно, воздух, используемый в промышленности как окислитель, обладает высоким содержанием азота (78-79%), который бесполезным балластом. Применение кислорода позволяет снизить, а при полном замещении воздуха полностью избавиться от азота. Уменьшение количества азота приводит к росту времени полезной работы газов в тепловом агрегате и уменьшению выбросов соединений азота. Основные преимущества использования кислорода в процессе сгорания: достигается более высокая температура горения, снижается расход топлива, возможность работы с низкокалорийным топливом, снижается объем выбросов дымовых газов. В тоже время, внедрение кислородного дутья сдерживается по причине высокой стоимости системы обеспечения кислородом, использование специальных горелок (при введении более 30% кислорода), перенастройка системы управления и автоматизации процесса горения и плавления или обжига, отсутствие отечественного опыта.

Работа выполнялась по заказу крупнейшего в Беларуси производителя продуктов разделения воздуха. Целью данной работы являлось разработка программы для определения параметров продуктов горения газообразного топлива с добавлением технического кислорода и без него. За основу расчета принимаются параметры стекловаренной печи № 5 ОАО «Полоцк-Стекловолокно».

Результаты расчета показали, что добавление каждых 5% кислорода ( $0,0989 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) в топку для горения природного газа позволяет снизить расход воздуха на  $0,55 \text{ м}^3/\text{м}^3$  газа и повысить рабочую температуру процесса горения на  $41-58^\circ\text{C}$ . Добавление каждых 5% кислорода в стекловаренную печь № 5 ОАО «Полоцк-Стекловолокно» позволяет снизить расход воздуха на  $104,3-88,7 \text{ м}^3/\text{ч}$  и природного газа на  $2,08-1,77 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В итоге, получили, что добавление  $7 \text{ м}^3$  кислорода соответствуют экономии  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКОВЫХ МЕЛЬНИЦ В ЗАРУБЕЖНОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЯХ

За последнее время в цементной промышленности были внедрены новые технологии помола цемента как альтернатива традиционным барабанным мельницам, работающим в замкнутом цикле с высокоэффективным сепаратором. Подобные технологии предполагают применение пресс-валковых и вертикальных валковых мельниц. Причем, вертикальные валковые мельницы заняли на данном этапе лидирующее место в цементной индустрии. Это обуславливается рядом их преимуществ перед другими агрегатами: компактность (сепаратор встроен в мельницу); пониженное потребление электроэнергии (5-10 кВт·ч/т, против 15-25 кВт·ч/т у барабанных); малые эксплуатационные расходы; высокая производительность – до 1000 т/час.

На основании анализа научно-технической информации, рекламных проспектов и сайтов основных производителей вертикальных валковых мельниц было собрана информация об опыте их эксплуатации в различных странах и технологиях. В настоящее время во всем мире на различных производствах используются более 2000 вертикальных валковых мельниц **Loesche**. Компания **FLSmidth** продала более 150 цементных вертикальных мельниц по всему миру. Компания **Gebr. Pfeiffer SE** поставляет автономные угольные мельницы **MPS**, а также комплексы для помола и сушки угля. Более 1000 мельниц **MPS** используется во всем мире для помола различных видов угля от бурого до кокса, включая тощий уголь и антрацит.

По данным 2012 г. на предприятиях только стран Латинской Америки установлены 85 вертикальных мельниц **Loesche**, из них 74 - на цементных заводах (включая, 22 установки для производства сырьевой муки, 27 – для помола цемента, 34 – для получения пылеугольного топлива. 2 – для помола промышленных минералов), а также более 30 компании **FLSmidth**. Более 50 вертикальных валковых мельниц успешно эксплуатируются в России, Украине и Казахстане. В Республике Беларусь на всех цементных заводах используются вертикальные валковые мельницы различных производителей для помола сырьевых компонентов и каменного угля. Перспективным направлением их дальнейшего применения является помол клинкера. Это позволило бы уменьшить себестоимость изготавливаемой продукции за счет снижения расходов на электроэнергию.

УДК 621.830

В. П. Кобринец, доц. канд. техн. наук;  
Н. П. Коровкина, доц. канд. пед. наук;  
Н. Н. Пустовалова, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, Минск)

## **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

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.

В настоящее время в мировой практике выполнен большой объем исследований и разработок нового вида электрических машин – вентильно-индукторных двигателей (ВИД) и базирующихся на них электроприводов. Этому способствует: большая простота устройства ВИД, определяющая относительно невысокую стоимость изготовления, а также простоту и дешевизну их эксплуатации.

ВИП – серьезный конкурент современных регулируемых электроприводов без ограничения по мощности, скорости и т.д.

Целью данной работы являлось определение экономии электрической энергии при замене асинхронных двигателей вентильно-индукторными. Экономичность оценивалась по: сэкономленной электроэнергии ( $\Delta W$ ), 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.

Проведенные расчеты показали, что при использовании вентильно-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 666.691

О.А. Петров, доц., канд. техн. наук (БГТУ, Минск)  
**ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ  
КАВИТАЦИОННОГО ТИПА**

Научно-исследовательский потенциал сверхкавитации, в совокупности с другими эффектами, такими как импульсные воздействия, ультразвук, раскрыт недостаточно и требует комплексного подхода, новых, зачастую нестандартных решений. Перспективы же применения аппаратов, основанных на этих эффектах, в различных областях промышленности и народного хозяйства становятся все более очевидными.

Предложенные на сегодняшний день методы исследования кавитации можно разделить на прямые и косвенные. Прямые методы включают в себя: визуальные (скоростная фото- и видеосъемка), акустические (измерение давления в ударных волнах) и кавитометрические (измерение кавитации кавитометрами различных типов). К косвенным методам можно отнести: механические (измерение величины кавитационной эрозии), технологические (изменения качественных показателей обрабатываемой среды), гидродинамические (изменение гидродинамических параметров потока), фотоэлектрические (регистрация сонолюминесценции) и химические (исследование изменения параметров вводимых химических реагентов). Однако при исследовании статических сверхкавитаторов, которые и являются нашим объектом, применение большинства этих методов вызывает определенные сложности. Отдельно можно отметить математическое описание процесса и моделирование процессов при помощи современных ПК и ПО, чему и была посвящена данная работа.

Изначально была построена базовая 3D модель статического сверхкавитатора, состоящего из сопла с соосным обтекателем, и исследована гидродинамика кавитационных течений при помощи модульного программного комплекса САПР. Причем, за величину, на основании которой делались выводы, было взято число кавитации  $Ka$  (модифицированный критерий Эйлера  $Eu_m$ ), как основной кавитационный параметр. Далее конструкция сверхкавитирующего аппарата усовершенствовалась с учетом предыдущих экспериментальных и теоретических исследований и моделировалась гидродинамика потока.

На основании построенных графических зависимостей числа кавитации от скорости жидкости, температуры, критерия Рейнольдса и др., была определена наиболее оптимальная и эффективная конструкция гидродинамического аппарата с точки зрения образования сверхкавитационных течений, возникающих при  $Ka < 0,5$ .

УДК 502.174.1

Е. В. Опимах, ассист., канд. техн. наук;  
А. Э. Левданский, доц., д-р. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **СХЕМА КЛАССИФИКАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИИ И ИХ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ**

Флотация как метод обогащения полезных ископаемых известна с XIX в. Английский изобретатель Уильям Хайнс в 1860 г. получил первый патент на применение масляной флотации. Флотация различается по объектам, межфазным границам, конструктивным признакам флотаторов, способу аэрации, технологическому назначению и другим признакам.

В существующих литературных источниках встречается описание типов флотации только по отдельным признакам. В горной энциклопедии есть схема классификации процессов флотации, но она также не содержит полного перечня признаков и сложна для восприятия. Поэтому основе литературных данных о способах флотации и их аппаратурному оформлению авторами была составлена своя наиболее полная схема классификации существующих процессов флотации.

Предлагаемая схема включает следующие типы классификации. По извлечению ценного (целевого) компонента: прямая, обратная; селективная, коллективная. По виду сырья: органическая, минеральная, ионная. По межфазным поверхностям: жидкость-твердое; жидкость-жидкость; жидкость-газ. В свою очередь флотация на границе раздела фаз жидкость-твердое подразделяется на коагуляцию и флотацию с носителем. А на границе раздела фаз жидкость-жидкость – на масляную и эмульсионную флотацию. На границе жидкость-газ – на пленочную и пенную. Пенная флотация наиболее широко представлена в промышленности. Пенный слой может образовываться двумя путями – при подаче газа в жидкость или при выделении газа из жидкости. Подают газ в жидкость либо принудительно под давлением (пневмомеханическая и пневматическая флотация), либо динамическим вовлечением (механическая, каскадная, эжекторная). Газ из жидкости выделяют нагревом, химически (реагентная или электрофлотация) и изменением давления (напорная, вакуумная). По типу аппаратурного оформления флотацию делят на корытную, камерную, колонную (чановую). А по режиму движения фаз в аппарате – на напорную, вибрационную, пульсационную и др. Предлагаемая схема позволяет полностью охарактеризовать большинство существующих процессов флотации.

УДК 502.174.1

Е. В. Опимах, ассист., канд. техн. наук;

А. Э. Левданский, доц., д-р. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АЭРАТОРА В ВИДЕ ПЛОСКОЙ СПИРАЛИ**

В настоящее время достижения в вычислительной динамике многофазных потоков обеспечивают высокую точность моделирования различных процессов при создании нового оборудования и совершенствовании существующего. Однако использование численного моделирования связано с высокими требованиями к квалификации инженеров, высокой производительности и надежности вычислительных средств и программных комплексов. Далекое не каждое предприятие, столкнувшееся с созданием либо совершенствованием оборудования, может позволить себе использование численного моделирования. Методики инженерного расчета не теряют своей актуальности и в настоящее время.

Методика инженерного расчета конструктивных и технологических параметров пневматического аэратора в виде спирали Архимеда (плоской с постоянным шагом) для аэрации флотационного аппарата включает в себя следующие этапы. 1. Исходя из условия ламинарного характера движения пузырьков, вычисляют максимально допустимую относительную скорость движения сферического пузырька и его соответствующий диаметр. 2. Зная оптимальное газосодержание в колонне (которое определяется экспериментально) рассчитывают относительную скорость стесненного всплытия пузырьков. 3. Определяют максимальный эквивалентный диаметр частицы, которую пузырек сможет поднять в пенный слой (технологический параметр). 4. Определяют размер отверстий аэратора. 5. Зная наружный диаметр трубки для изготовления аэратора, получают максимально возможное значение числа отверстий аэратора, удовлетворяющих условию свободного прохождения частиц ниже уровня аэратора. 6. Определяют шаг спирали (и шаг перфорации). 7. Рассчитывают длину трубки аэратора. 8. Находят допустимый расход газа – что также является важным технологическим параметром аэратора.

А. И. Клындюк, доц., канд. хим. наук;  
 А. В. Скриганова, студ.; Г. И. Минаков, студ.;  
 Е. А. Чижова, доц., канд. хим. наук  
 (БГТУ, г. Минск)

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ

### $\text{Bi}_{3.85}\text{Ln}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ( $\text{Ln} - \text{Pr}, \text{Nd}$ )

Титанат висмута  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  со структурой типа фазы Ауривиллиуса является сегнетоэлектриком с высокой температурой Кюри ( $T_C = 948 \text{ K}$  [1]). Способность сохранять сегнетоэлектрические свойства в широком интервале температур позволяет рассматривать его как перспективный материал для радио-, акусто- и оптоэлектроники, пригодный для изготовления оптических дисплеев, пьезоэлектрических преобразователей, фильтров, радиотехнических конденсаторов, а также запоминающих устройств различных типов. Улучшения функциональных свойств  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  может быть достигнуто путем частичного замещения в нем ионов висмута ионами редкоземельных элементов, что обуславливает интерес к твердым растворам не его основе как перспективным как перспективным функциональным материалам различного назначения.

В данной работе твердофазным методом получена керамика на основе твердых растворов  $\text{Bi}_{3.85}\text{Ln}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  ( $\text{Ln} - \text{Pr}, \text{Nd}$ ), изучены ее кристаллическая структура, микроструктура, тепловое расширение, электропроводность, термо-ЭДС и диэлектрические свойства.

Согласно результатам ЭЗМА и РФА, керамика  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{3.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  имела заданный катионный состав и была однофазной, а ее структура соответствовала структуре базового титаната висмута, а параметры кристаллической структуры, с учетом погрешности, практически не отличались от таковых для  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ . Найдено, что частичное замещение висмута празеодимом в  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  приводит к увеличению размера зерен керамики и ее частичному текстурированию, а замещение висмута неодимом – к уменьшению размера зерен керамики.

Установлено, что материалы  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{3.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  являются полупроводниками  $p$ -типа, величина температуры Кюри, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), электропроводности и диэлектрических потерь которых ниже, а диэлектрическая проницаемость – выше, а коэффициент термо-ЭДС имеет, с учетом погрешности эксперимента, такие же значения, как и для незамещенного слоистого титаната висмута  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ . Найдено, что при фазовом переходе сегнетоэлектрик  $\rightarrow$  параэлектрик ТКЛР керамики скачкообразно возрастает (для твердого раствора  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  от  $9.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  до  $13.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), а энергия активации электропроводности

на постоянном токе ( $E_A$ ) уменьшается (для  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  от 1.56 эВ до 0.49 эВ), причем частичное замещение в  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  висмута празеодимом или неодимом приводит к снижению  $E_A$  керамики как в сегнетоэлектрической, так и в параэлектрической области.

Температура Кюри керамики  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{3.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  была частотно независимой, из чего следует, что эти материалы являются нормальными сегнетоэлектриками. Увеличение частоты переменного электрического тока приводило к существенному снижению диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь керамики вследствие уменьшения числа вкладов в ее поляризацию при высоких частотах. Значения констант ( $C$ ,  $\Theta$ ) в уравнении Кюри–Вейсса ( $\epsilon = C/(T - \Theta)$ ) для образца  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  составили  $C = 1.63 \cdot 10^5$  К и  $\Theta = 821$  К, причем величина константы Кюри–Вейсса ( $C$ ) полученной нами керамики имеет тот же порядок, что и для такого известного диэлектрика, как  $\text{BaTiO}_3$  ( $C = 1.7 \cdot 10^5$  К [2]). Согласно результатам комплексной импедансной спектроскопии, электросопротивление керамики  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{3.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  определяется электросопротивлением зерен, а значение энергии активации внутризеренной проводимости для образца  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  составляет 0.65 эВ. На зависимостях  $Z'' = f(\nu)$  и  $M'' = f(\nu)$  изученной керамики наблюдались максимумы ( $f(Z'')$  и  $f(M'')$ ), указывающие на наличие поляризационных процессов. Значения энергии активации релаксации титаната  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ , найденные из зависимостей  $\ln[f(Z'')] = f(1/T)$  и  $\ln[f(M'')] = f(1/T)$ , составили 0.60 эВ и 0.44 эВ соответственно, причем первое значение близко к величине энергии активации внутризеренной проводимости керамики (0.65 эВ). Данные спектроскопических исследований указывают на то, что керамика  $\text{Bi}_{3.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_{3.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  является электрически негомогенной, а релаксационные процессы в ней носят недебаевский характер.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.17.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Scott, J.F. Ferroelectric memories / J.F. Scott, C.A. Araujo // Science. – 1989. – V. 246. – P. 1400–1405.
2. Kumar, S. Structural and dielectric properties of  $\text{Bi}_4\text{Ti}_2\text{Nb}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{12}$  / S. Kumar, K.B.R. Varma // Solid State Commun. – 2008. – V. 146. – P. 137–142.



А. И. Клындюк, доц., канд. хим. наук;  
 Н. С. Красуцкая, мл. научн. сотр.; М. Э. Слижевская, студ.  
 (БГТУ, г. Минск)

## СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ ОКСИДОВ ВИСМУТА–КАЛЬЦИЯ $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ , $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$ И ВИСМУТА–КОБАЛЬТА $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$ КАК ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ ПРИ СИНТЕЗЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕ- СКОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СЛОИСТЫХ КОБАЛЬТИТОВ ВИСМУТА–КАЛЬЦИЯ

Двойные оксиды висмута–кальция (кобальта)  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$  и  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  представляют интерес как предшественники при синтезе оксидных термоэлектриков  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Co}_{1.7}\text{O}_y$  и  $(\text{Ca},\text{Bi})_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ , а также как примесные фазы в термоэлектрических композитах на основе слоистых оксидов висмута–кальция.

В данной работе твердофазным методом из  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Co}_3\text{O}_4$  на воздухе в интервале температур 923–1143 К были получены керамические образцы двойных оксидов  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$  и  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$ . Кристаллическая структура образцов была исследована при помощи рентгенофазового анализа (РФА) (рентгеновский дифрактометр Bruker D8 XRD,  $\text{CuK}\alpha$  излучение ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ )). Тепловое расширение, электропроводность ( $\sigma$ ) (на постоянном и переменном ( $\nu = 1 \text{ кГц}$ ) токе), диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) и диэлектрические потери ( $\text{tg}\delta$ ) ( $\nu = 1 \text{ кГц}$ , для образца  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  –  $\nu = 0.2\text{--}100 \text{ кГц}$ ) керамики были изучены на воздухе в интервале температур 290–1070 К.

Найдено, что  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$  кристаллизуется в триклинной сингонии ( $a = 1.01(2) \text{ нм}$ ,  $b = 1.01(5) \text{ нм}$ ,  $c = 1.05(3) \text{ нм}$ ,  $\alpha = 116.9(1)^\circ$ ,  $\beta = 107.14(3)^\circ$ ,  $\gamma = 92.89^\circ$ ,  $V = 0.890 \text{ нм}^3$ ,  $\rho_{\text{рент}} = 6.47 \text{ г/см}^3$ ),  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$  – в моноклинной ( $a = 1.664(7) \text{ нм}$ ,  $b = 1.162(1) \text{ нм}$ ,  $c = 1.402(7) \text{ нм}$ ,  $\beta = 134.17(2)^\circ$ ,  $V = 1.945(26) \text{ нм}^3$ ,  $\rho_{\text{рент}} = 7.13 \text{ г/см}^3$ ), а  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  – в кубической ( $a = 1.021(1) \text{ нм}$ ,  $V = 1.063(16) \text{ нм}^3$ ,  $\rho_{\text{рент}} = 9.00 \text{ г/см}^3$ ), что близко к литературным данным. Кажущаяся плотность спеченной керамики составила 5.78, 4.82 и 7.42  $\text{г/см}^3$  соответственно для  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$  и  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$ .

Установлено, что электропроводность изученных материалов носит полупроводниковый характер, причем увеличение содержания  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в керамике приводит к росту ее электропроводности, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь. Значения среднего температурного коэффициента линейного расширения составляют  $12.9 \cdot 10^{-6}$ ,  $14.7 \cdot 10^{-6}$  и  $16.0 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , энергии активации электропроводности на постоянном токе – 1.393, 1.159 и 0.499 эВ, а температур максимума

диэлектрических потерь за счет дипольной поляризации – 923, 780 и 681 К для  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi}_2\text{CaO}_4$  и  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  соответственно.

На температурной зависимости диэлектрической проницаемости фазы  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  обнаружен слабо выраженный максимум при температуре 845 К, связанный, очевидно, с частичным разупорядочением диполей в его кристаллической структуре, а также выраженный размытый максимум, температура которого сильно зависела от частоты электрического поля и составила 437 К, 487 К, 585 К и 656 К при частотах 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц соответственно. Результаты исследования диэлектрической проницаемости  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  в широком диапазоне частот позволяют предположить, что это соединение является сегнетоэлектрическим релаксором.

Керамика состава  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  была также исследована при помощи комплексной импедансной (КИС) и комплексной модульной спектроскопии (КМС) в интервале частот 100 Гц – 1 МГц и температур 290–590 К. Согласно результатам КИС, электросопротивление керамики определяется электросопротивлением зерен, причем энергии активации внутризеренной проводимости составляет 0.349 эВ. На зависимостях  $Z'' = f(\nu)$  и  $M'' = f(\nu)$  керамики  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  наблюдались максимумы, указывающие на наличие поляризационных процессов. Значения энергии активации релаксации фазы  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$ , найденные на основании данных КИС и КМС, составили 0.351 эВ, что близко к энергии активации ее внутризеренной проводимости (0.349 эВ). Согласно результатам спектроскопических исследований, керамика  $\text{Bi}_{24}\text{Co}_2\text{O}_{39}$  является электрически гомогенной, а релаксационные процессы в ней описываются в рамках модели Дебая.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.26.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rawn, C.J. Powder X-ray diffraction data for  $\text{Ca}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$  and  $\text{Ca}_4\text{Bi}_6\text{O}_{13}$  / C.J. Rawn, R.S. Roth, H.F. McMurdie // Powder Diffraction. – 1992. – V. 7. – N. 2. – P. 109–111.
2. Haemers, T.A.M. Structure Determination of Calcium Dibismuth Tetraoxide / T.A.M. Haemers, D.J.W. Ido, R.B. Helmholtz // Mat. Res. Bull. – 1992. – V. 27. – P. 1243–1248.
3. Jankovský, O. Phase diagram of the pseudobinary system Bi–Co–O / O. Jankovský, D. Sedmidubský, Z. Sofer // J. of the Eur. Ceram. Soc. – 2013. – V. 33. – P. 2699–2704.

УДК 621.317.343.3

Л.С. Грищенко, магистрант;  
Н. П. Иванова, доц., канд. хим. наук;  
В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук;  
В.А. Ашуйко, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

## ВЛИЯНИЕ ИНГИБИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ ГОРЯЧЕОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ

Коррозионные процессы, протекающие на поверхности металлоконструкций, сокращают их срок службы и могут приводить к аварийным ситуациям. Применение ингибиторов коррозии является наиболее распространенным и дешевым способом воздействия на коррозионную среду с целью защиты металлических материалов от коррозионных воздействий [1].

Цель данных исследований – поиск ингибиторов коррозии горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащей среде и исследование их ингибирующего действия. Для изучения коррозионной стойкости горячеоцинкованной стали в работе использован электрохимический метод импедансной спектроскопии. В качестве материалов исследования были выбраны образцы из горячеоцинкованной стали площадью  $8 \text{ см}^2$ . Коррозионной средой являлся 3% раствор  $\text{NaCl}$  с введением смеси  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  при концентрации  $0,00015 \text{ М}+0,00015 \text{ М}$ ;  $0,0002 \text{ М}+0,0002 \text{ М}$ ;  $0,001 \text{ М}+0,001 \text{ М}$ ;  $0,01 \text{ М}+0,01 \text{ М}$ .

Подготовка образцов из горячеоцинкованной стали перед проведением коррозионных испытаний заключалась в обезжиривании в тетрахлорметане, ацетоне и в растворе хлорида аммония с концентрацией  $100 \text{ г/дм}^3$  при температуре  $60\text{--}70^\circ\text{C}$  в течение 2–3 минут.

В эквивалентной схеме (рисунок 1) приняты следующие обозначения:  $R_1$  – сопротивление раствора;  $R_2$  – сопротивление переноса заряда анодной реакции растворения цинка;  $CPE$  – емкость барьерного слоя на границе раздела горячеоцинкованная сталь-раствор;  $W$  – диффузионный элемент Варбурга. Диффузионный элемент Варбурга отражает вклад диффузионных стадий в механизм анодного окисления горячеоцинкованной стали [2].

На рисунке 2 представлены диаграмма Боде (*a*) и Найквиста (*б*) для 3% раствора  $\text{NaCl}$  при введении  $0,002 \text{ М Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $0,002 \text{ М NH}_4\text{VO}_3$ . На диаграмме Найквиста наблюдается искаженная полуокружность (рисунок 2, *a*) с центром ниже оси абсцисс, что может указывать на то, что перенос заряда является лимитирующей стадией анодного окисления цинка. При низких частотах на диаграмме Найквиста появляется «хвостик», что свидетельствует об образовании на

горячеоцинкованной поверхности гетерополисоединения ванадомолибдата.

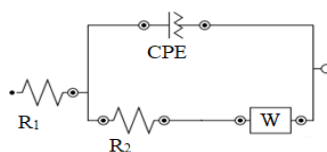


Рисунок 1 – Эквивалентная схема горячеоцинкованной стали в 3% растворе хлорида натрия без добавления и с добавлением ингибиторов коррозии

Метод импедансной спектроскопии показывает увеличение сопротивления анодной реакции окисления цинка ( $R_2$ ) при введении смеси ингибиторов (0,0002 + 0,0002 М) в 4,5 раза, при (0,001+0,001 М) в 9,8 раз, при (0,01+0,01 М) в 1,5 раз в начальный момент времени коррозии и в 2 раза при (0,01+0,01 М) при выдержке образца в коррозионной среде 24 ч.

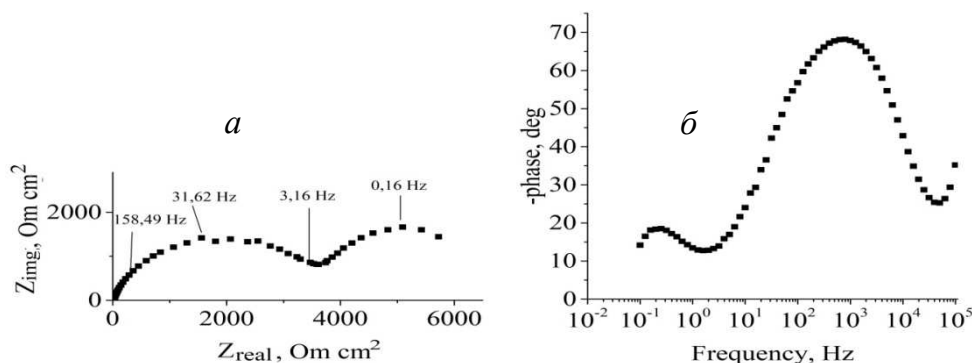


Рисунок 2 – Диаграмма Найквиста (а) и Боде (б) для 3% раствора NaCl при введении смеси  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  концентрацией 0,002 М+0,002 М

Таким образом, смесь молибдата натрия и метеванадата аммония проявляет ингибирующие свойства и может быть рекомендована для защиты горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащей среде.

#### ЛИТЕРАТУРА

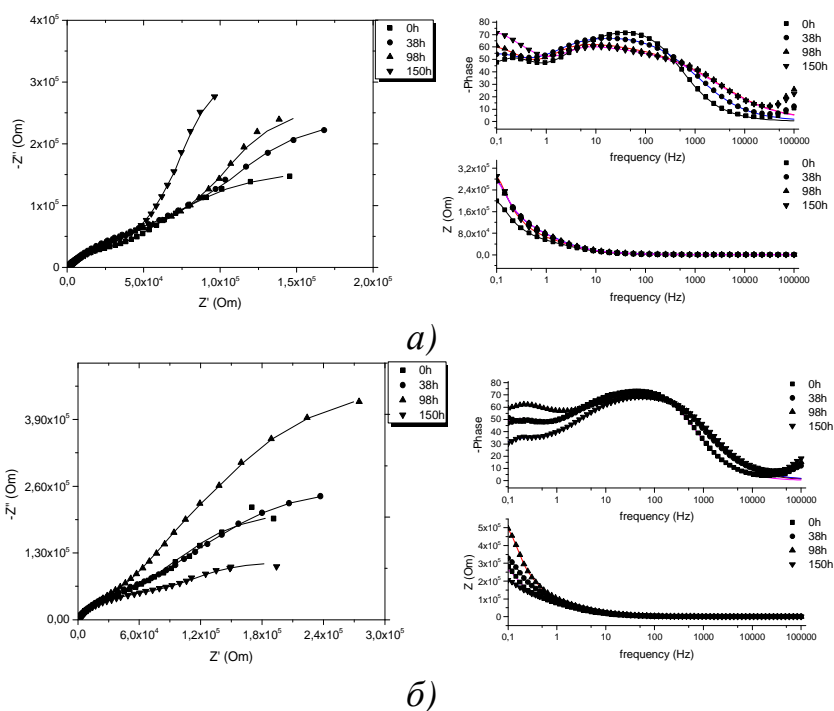
1. F.C. Porter, Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys, First edition, MarcelDekker, Inc, New York, 1994.
2. Электроаналитические методы. Теория и практика / Под ред. Ф. Шольца; Пер. с англ. Под ред. В. Н. Майстренко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 326 с.

УДК 620.197; 544.6.018.23

А.В. Кешин, асп.; А.А. Черник, доц., канд. хим. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНОДНО-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Рассматриваемые, в данной работе, покрытия формировались на алюминиевом деформируемом сплаве марки АД31, в сернокислых электролитах анодирования с добавками парамолибдата аммония и метаванадата аммония. Анодирование проводилось в гальваностатическом режиме при анодной плотности тока  $1 \text{ А/дм}^2$ , напряжение в ходе протекания процесса изменялось в интервале 12-17 В, продолжительность составляла 1 час. Полученные таким образом покрытия помещались в 0,03 М раствор хлорида натрия, выступающий в качестве коррозионной среды и выдерживались в ней в течении 150 часов. Оценка защитных свойств проводилась с применением импедансной спектроскопии и метода электрохимической частотной модуляции.



**Рисунок 1 – Результаты электрохимической импедансной спектроскопии, полученные в 0,03М растворе NaCl для АОП сформированного в сернокислом электролите, содержащем:**  
**а) 0,017М –  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; б) 0,01М –  $\text{NH}_4\text{VO}_3$**

Проведя анализ полученных данных представленных на рисунке 1, для покрытий, содержащих 2,03 масс. % Мо, видна тенденция роста

амплитуды импеданса по мере протекания коррозии, а также рост общего поверхностного сопротивления, так оно составляет  $2,0755 \times 10^5$ ,  $2,8872 \times 10^5$ ,  $2,8978 \times 10^5$  и  $3,1 \times 10^5$  Ом/см<sup>2</sup>, соответственно для каждого рассмотренного временного интервала. Помимо роста сопротивлений, показанных на диаграммах Найквиста и Боде, по результатам EFM-исследования выявлено, что молибденсодержащие покрытия обладают способностью к самопассивации, сопровождающейся капсуляцией пор, анодного оксида. Данный процесс сопровождается изменением значений скорости коррозии и поляризационного сопротивления. Так в интервале 0-38 часов скорости коррозии составляют  $0,00031761 - 0,00026979$  мм/год и поляризационное сопротивление  $1,0548 \times 10^5 - 1,3671 \times 10^5$  Ом. По окончании 98 часов исследования наблюдается резкий рост скорости коррозии до  $0,001387$  мм/год, вызванный открытием пор и возникновением локальных очагов разрушения покрытия, далее по мере нахождения в коррозионной среде этот процесс замедляется и на 150-й час исследования, скорость коррозии составляет  $0,0023531$  мм в год. Несмотря на протекание коррозии в порах, поляризационное сопротивление изменяется незначительно, в интервале  $1,5235 \times 10^5 - 1,2495 \times 10^5$  Ом/см<sup>2</sup>.

Диаграммы Найквиста для покрытия, содержащего 0,11 масс. % V показывают, что по мере увеличения времени выдержки в коррозионной среде происходит снижение амплитуды спектра характерная для растворения внешнего защитного покрытия. Анализ диаграмм Боде показал, что в ходе коррозионного испытания в течении 150 часов наблюдается постепенный рост сопротивления в интервале 0-98 часов исследования от  $2,95 \times 10^5$  Ом/см<sup>2</sup> до  $5,23 \times 10^5$  Ом/см<sup>2</sup> с последующим падением до  $2,19 \times 10^5$  Ом/см<sup>2</sup> при 150 часах испытания. Данное снижение сопротивление обусловлено пробоем защитной оксидной пленки в порах. Так полученные значения поляризационного сопротивления в интервале 0-98 часов составляли  $1,289 \times 10^5$ ,  $1,6737 \times 10^5$  и  $2,974 \times 10^5$  Ом при скоростях коррозии  $0,00031787$ ,  $0,00053638$  и  $0,0018629$  мм/год, в интервале 98-150 часов, данные численные значения составляют  $0,0018629 - 0,00070791$  мм/год и  $2,974 \times 10^5 - 1,479 \times 10^5$  Ом. Как видно, в интервале около 98 часов исследования отчетливо виден рост скорости коррозии и поляризационного сопротивления, сопровождающийся, увеличением амплитуды годографа импедансного спектра, что вероятнее всего связано с протеканием процесса окисления алюминия соединениями ванадия, находящимися в составе анодно-оксидной пленки.

УДК 669

А. А. Черник, доц., канд. хим. наук; А. В. Пянко, асп.,  
(БГТУ, г. Минск)

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ НАНЕСЕНИЕ СПЛАВА ОЛОВО-НИКЕЛЬ

Электрохимическое покрытие сплавом олово-никель, которое содержит 60%-65% олова, имеет ряд преимуществ: высокая химическая стойкость по отношению ко многим агрессивным средам (разбавленной серной и соляной, концентрированной азотной кислотам, растворам хлористого натрия) и в условиях 100% влажности, гипоаллергенность, высокие декоративные свойства без промежуточного никелирования, высокие механические свойства, высокие выходы по току нанесения сплава, возможность использования в качестве подслоя для ювелирных изделий, применение в производстве печатных плат.

Электрохимическое нанесение сплава олово-никель возможно осуществлять из водных растворов хлористых солей, однако для получения высоких декоративных и функциональных свойств покрытий нужно добавлять в электролит фториды.

Электролиты готовят путем растворения в воде хлорида никеля и последующего добавления к этому раствору фторидов аммония и хлорида олова. Корректируют pH соляной кислотой.

Установлено, что характер и свойства поверхности сплава зависят от плотности тока при осаждении. Так, при плотностях тока выше  $1 \text{ А/дм}^2$  композиционные покрытия имеют черный цвет и матовую текстуру. При плотностях тока  $0,5-0,7 \text{ А/дм}^2$  покрытия – полуматовые и при  $0,1-0,4 \text{ А/дм}^2$  – плотные блестящие.

Температура является важнейшим фактором получения качественного покрытия. Установлено влияние температуры на структуру и морфологию покрытия. Так, при температуре ниже  $50^\circ\text{C}$  покрытия получаются неплотные, рыхлые, отсутствует адгезия покрытия с металлической подложкой, а при температурах выше  $70^\circ\text{C}$  происходит подгар покрытий. Таким образом, оптимальным температурным режимом является  $50-70^\circ\text{C}$ .

Основываясь на экспериментальных данных, определены выходы по току, диапазоны температур и плотностей тока для получения блестящих, прочносцепленных с основой электрохимических покрытий олово-никель. Определена возможность создания новых композиционных покрытий на основе сплава олово-никель.

Н.Е. Акулич, асп., К.Ю. Мурашко, студ.;  
Н.П. Иванова, доц., канд. хим. наук;  
И.М. Жарский, проф., канд. хим. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ МОЛИБДЕНОВОЙ ПАССИВАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

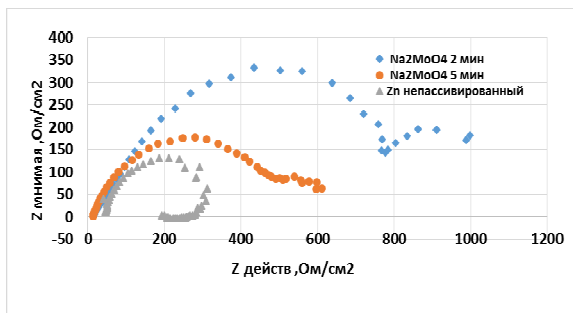
В настоящее время цинкование является наиболее распространённым способом металлизации железа для защиты его от атмосферной коррозии. Увеличение коррозионной стойкости цинковых покрытий возможно нанесением на металл пассивных плёнок, чаще всего получаемых из растворов, содержащих соединения Cr (VI). Соединения шестивалентного хрома, которые неизбежно присутствуют в хроматных плёнках, весьма токсичны и являются канцерогенами. Поэтому разработка альтернативных методов коррозионной защиты оцинкованных поверхностей является целью многих отечественных и зарубежных исследователей.

Целью работы является разработка растворов пассивации на основе молибдатов натрия и исследование защитной способности и коррозионной стойкости полученных конверсионных плёнок на цинковых покрытиях, осажденных из аммонийно-хлоридного электролита.

Для создания пассивной плёнки на поверхности свежесажденного цинка образцы погружали в раствор с концентрацией  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  0,5 моль/дм<sup>3</sup>. Кислотность раствора доводили до значения 3 путем добавления концентрированной ортофосфорной кислоты. Время химической пассивации составляло 2 и 5 мин, температура раствора 20 °С.

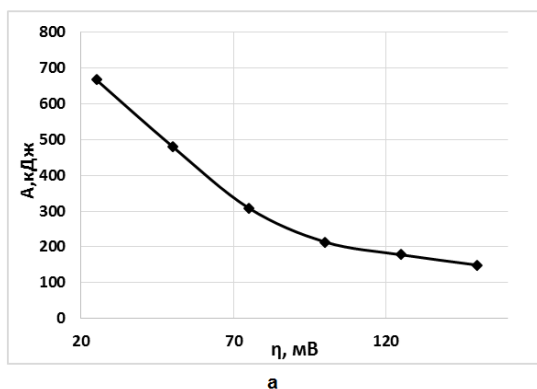
С целью определения оптимального времени пассивации и определения сопротивления пассивного слоя на поверхности были проведены исследования электрохимической импедансной спектроскопии. На диаграммах Найквиста (рисункок 1) для образцов с пассивированным цинковым покрытием в растворе хлорида натрия присутствуют две соединенные между собой искаженные полуокружности. Полуокружность на более высоких частотах обычно связана с сопротивлением пассивной плёнки, а полуокружность на более низких частотах указывает на процесс растворения цинка в дефектах пассивной плёнки. Измерения электрохимической импедансной спектроскопии, зарегистрированные для цинкового покрытия, показали одну полуокружность.



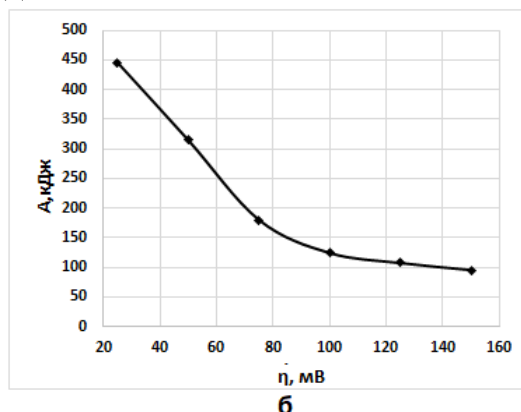


**Рисунок 1 – Диаграмма Найквиста для цинкового и конверсионных покрытий на основе молибдата натрия в растворе хлорида натрия**

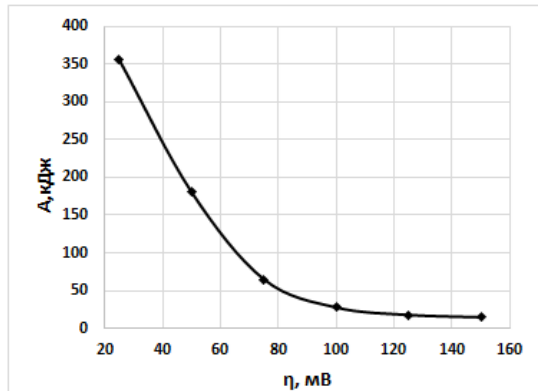
Для определения энергии активации анодного процесса растворения цинкового и конверсионных покрытий в 3 % NaCl в работе использован термокинетический метод.



**а**



**б**



**в**

**Рисунок 2 – Зависимость энергии активации процесса растворения цинкового покрытия (а) от перенапряжения; б, в – для покрытий, полученных в растворе на основе  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  в течение 2 и 5 мин соответственно**

Установили, что реакция растворения цинкового неактивированного покрытия на стали в 3% NaCl лимитируется стадией разряда ионов.

На основании экспериментальных данных, сделали заключение о том, что реакция растворения цинкового химически пассивированного покрытия на стали в 3% NaCl лимитируется стадией разряда ионов. Однако, в диапазоне перенапряжений 100-150 мВ реакции растворения цинкового химически пассивированного покрытия, полученного в растворе на основе молибдата натрия, в 3% NaCl контролируются диффузией.

УДК 621.794.4:661.862.22

Н.В. Богомазова, доц., канд. хим. наук;  
 Т. А. Галковский, магистрант;  
 А.Н. Комаренко, студ.;  
 А.Н. Мурашкевич, проф., д-р техн. наук  
 (БГТУ, г. Минск)

## ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ПЛАНАРНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Все более широкое практическое применение в электронике находят упорядоченные микро- и нанодисперсные гетероструктуры, которые используются для создания эффективных НЕМТ-транзисторов, лазеров, фотоэлементов, светодиодов. Использование полупроводниковых гетероструктур с наномеразмерными слоями полупроводника позволяет за счет эффектов оптического и пространственного квантования, широкозонного окна, сверхинжекции, не просто улучшать параметры микро-, нано- и оптоэлектронных приборов, но и получать приборы с новыми функциональными возможностями.

В наших исследованиях проводились эксперименты по формированию тонких пленок полупроводниковых сульфидов олова и цинка, в том числе в составе гетероструктур, на планарные стеклянные подложки методом ионного наплаивания.

Исследование режимов ионного наплаивания сульфидных слоев Zn, Sn на поверхность планарных подложек ИТО/стеклопластина показали, что при использовании гидратной подготовки поверхности наплаивания сульфидов Sn на ИТО практически не происходит. Формирование пленочной гетероструктуры с развитой поверхностью наблюдалось в результате использования отмывки в полярных органических растворителях и ультразвуковой обработки поверхности подложек для варианта наплаивания 20 мс ZnS/ 20 мс SnS<sub>x</sub>.

Для сформированной структуры ZnS/SnS<sub>x</sub>, основанной на широкозонном окне в виде ZnS и фотопоглощающем узкозонном слое SnS были проведены фотоэлектрические измерения. Они показали, что в сформированном функциональном контакте при облучении белым светом мощностью около 11 Вт генерируется фотоЭДС порядка 230 мВ, что на 35 % превышает результат для аналогичной структуры, полученной методом электрохимического осаждения [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lasisi, A. R. Fabrication and characterization of tin sulphide SnS sased thin film solar cells / A.R. Lasisi [et al] // Asian J. Science and Technology. – 2016. – Vol. 07, Issue 11. – P. 3887–3890.

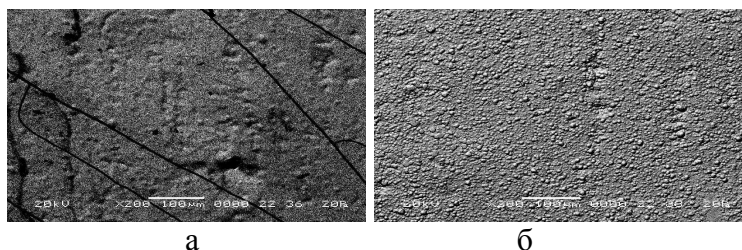
УДК 544.654.2

И. И. Курило, доц., канд. хим. наук;  
 С. Л. Радченко, доц., канд. техн. наук;  
 И. М. Жарский, проф., канд. хим. наук;  
 А. А. Касач, магистрант (БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ СОНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ СПЛАВА МЕДЬ–ОЛОВО**

Вследствие хороших физико-механических характеристик (высокой твердости, износостойкости, способности к пайке) и устойчивости к атмосферной коррозии электрохимически осажденные сплавы Cu–Sn востребованы в различных областях машино- и приборостроении. Однако их широкое применение сдерживается недостаточной изученностью и малыми скоростями процесса нанесения покрытия. Известно, что одним из наиболее перспективных способов интенсификации электрохимических реакций является наложение ультразвукового (УЗ) поля. Целью данной работы являлось изучение влияния сонохимической обработки на процесс электроосаждения оловянистой бронзы.

Покрытия получали из электролита следующего состава, г/дм<sup>3</sup>: сульфат меди пятиводный 20–25, сульфат олова 3–10, оксалат аммония 45–55, ацетат натрия 10–20, желатин 0,1–0,5, ванилин 0,1–0,5, метиленовый синий 0,032. Сонохимическую обработку проводили с использованием ультразвукового гомогенизатора марки UP 200 Нт



**Рисунок – Микрофотографии поверхности сплава Cu–Sn, полученные в стационарных условиях (а) и при наложении УЗ поля (б). Катодная плотность тока 0,5 А/дм<sup>2</sup>. Температура 20°С**

Тест в ячейке Хулла показал, что в стационарных условиях качественные блестящие осадки (Cu – 85%, Sn – 15 %) можно получить при плотностях тока 0,1–0,5 А/дм<sup>2</sup>. Наложение УЗ поля позволяет существенно снизить внутренние напряжения электрохимически формируемого покрытия (рисунок), улучшить его физико-механические характеристики и интенсифицировать процесс.

УДК 544-165.2+538.958

И.А. Алексеенко, асп.;

Л.А. Башкиров, гл. н. сотр., д-р хим. наук, проф.;

Е.К. Южно, ассист.;

И.Н. Кандидатова, ассист., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск);

П.П. Першукевич, ст. н. сотр., канд. физ.-мат. наук  
(ГНУ «Институт физики НАНБ», г. Минск)

**СПЕКТРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ  $\text{LaInO}_3$ ,  
ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Sb}^{3+}$**

Исследование физико-химических свойств твердых растворов на основе  $\text{LaInO}_3$ , легированного ионами редкоземельных и ряда других элементов, представляет собой актуальную научную и практическую задачу. Одной из перспективных областей применения твердых растворов на основе  $\text{LaInO}_3$  является их использование в дисплеях с автоэлектронной эмиссией (FED-дисплеях), а также в фотолуминофорах белого цвета свечения. Оксидные фотолуминофоры, такие как  $\text{LaInO}_3 : \text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln}$  – редкоземельный элемент), отвечают всем требованиям, предъявляемым к люминофорам для FED-дисплеев, так как обладают достаточной проводимостью, позволяющей избежать накопления электрического заряда на их поверхности, а также химической и термической стабильностью. Для всех люминофорных светодиодов белого цвета свечения характерна нехватка красного компонента в спектре излучения. Следовательно, задача поиска химически и термически стабильных люминофоров, излучающих в красной области видимого спектра, является актуальной.

Индаты со структурой орторомбически искаженного перовскита  $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{InO}_3$  ( $x = 0,01; 0,10$ ),  $\text{La}_{0,97}\text{Eu}_{0,01}\text{Sm}_{0,02}\text{InO}_3$ ,  $\text{La}_{0,88}\text{Eu}_{0,1}\text{Sm}_{0,02}\text{InO}_3$ , а также образцы, содержащие кроме этих ионов редкоземельных элементов ионы  $\text{Sb}^{3+}$ , были получены твердофазным методом из оксидов  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Показано, что в  $\text{Sb}^{3+}$ -содержащих образцах присутствует незначительное количество примесной фазы неустановленной природы. В спектрах возбуждения люминесценции присутствуют полосы, расположенные в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Установлено, что все образцы являются фотолуминофорами, излучающими свет в красной области спектра. Показано, что в спектрах фотолюминесценции всех полученных индатов, легированных одновременно ионами  $\text{Eu}^{3+}$ – $\text{Sm}^{3+}$ , присутствуют полосы возбуждения и фотолюминесценции ионов  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$ . Впервые установлено, что ионы  $\text{Sb}^{3+}$  являются сенсбилизатором фотолюминесценции ионов  $\text{Eu}^{3+}$  в матрице  $\text{LaInO}_3$ .

УДК 544.65: 544.4:661

Ю. А. Егорова, асп.; А. В. Сарнова, студ.;  
П. Б. Кубрак, доц., канд. хим. наук;  
И. М. Жарский, проф., канд. хим. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО- АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ АНИОННОГО И КАТИОННОГО ТИПОВ ПРИ АНОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Методом циклической вольтамперометрии исследовано влияние катионных и анионных поверхностно-активных веществ (КПАВ и АПАВ) триметилдодециламмоний бромид (ТМ) и додецилсульфат натрия (DSN) соответственно на анодный процесс на платиновом электроде в щавелевокислом электролите.

На циклических вольт-амперных кривых появление анодных токов в электролитах, содержащих КПАВ, проявляется при потенциалах 1.1 В, а в в электролитах, содержащих АПАВ – 1.0 В, в то время как в эталонном электролите анодный ток начинает расти при потенциале 0,8 В, что соответствует разложению  $C_2H_2O_4$  до  $CO_2$ .

При концентрациях ТМ 5 ммоль/л и выше наблюдается уменьшение скорости процесса деструкции  $C_2H_2O_4$ , что может быть связано с адсорбцией монослоя КПАВ на поверхности электрода. Введение DSN не блокирует поверхность электрода, что объясняется отсутствием дополнительных максимумов на потенциодинамических кривых по сравнению с электролитом, содержащим КПАВ.

При концентрации 5 и 10 ммоль/л ПАВ ТМ в области потенциалов 1,12 – 1,26 В наблюдается уменьшение тока, что связано с протеканием диффузионных или химических процессов на электроде, а дальнейшее увеличение тока, вероятнее всего, связано с выделением  $O_2$ . В области малых токов при концентрациях DSN от 0,1 ммоль/л до 10 ммоль/л угол наклона кривых не изменяется, что свидетельствует об отсутствии промежуточных стадий разложения органических соединений при анодном процессе.

В процессе исследований поведения АПАВ и КПАВ на анодный процесс установлено, что добавление КПАВ, концентрацией 5 ммоль/л и выше, оказывает тормозящее действие на скорость анодного процесса, вероятнее, из-за адсорбции на поверхности рабочего электрода поверхностно-активных веществ. Анионное поверхностно-активное вещество DSN не уменьшает скорость протекания химических процессов.

УДК 621.318.1

Г.Г. Печенова, студ.; В.В. Саскевич, студ.;  
И.А. Великанова, доц., канд. хим. наук;  
Г. П. Дудчик, доц., канд. хим. наук (БГТУ, Минск)

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА ВИСМУТА $\text{BiFeO}_3$

Твердофазным методом впервые синтезированы твердые растворы ферритов  $\text{Bi}_{1,8}\text{La}_{0,2}\text{Fe}_4\text{O}_9$ ,  $\text{Bi}_{1,6}\text{La}_{0,1}\text{Fe}_4\text{O}_9$  и  $\text{Bi}_{1,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_4\text{O}_9$ , исследован ряд их физико-химических и электромагнитных свойств, в том числе ИК-спектры, намагниченность, термо-эдс и термическое расширение. Полученные твердые растворы  $\text{Bi}_{2-x}\text{La}_x\text{Fe}_4\text{O}_9$  ( $x = 0,2; 0,4$ ) использовались в качестве прекурсоров для получения сегнетомагнетиков на основе феррита висмута состава  $\text{Bi}_{0,95}\text{La}_{0,05}\text{FeO}_3$ ,  $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$  и  $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$ . Твердые растворы указанных выше составов получены твердофазным методом в две стадии: первая стадия – синтез прекурсоров  $\text{Bi}_{2-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_4\text{O}_9$  ( $\text{Ln} - \text{La, Pr}; x = 0,2; 0,4$ ) из соответствующих оксидов висмута, лантана, празеодима и железа, вторая стадия – синтез целевых продуктов  $\text{Bi}_{0,95}\text{La}_{0,05}\text{FeO}_3$ ,  $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$  и  $\text{Bi}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{FeO}_3$  путем взаимодействия полученных прекурсоров и оксида висмута. На основании данных рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии установлены оптимальные температурно-временные условия синтеза твердых растворов сегнетомагнетиков, свободных от присутствия нежелательных примесей антиферромагнитной фазы  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  и парамагнитной фазы  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ . Рассчитаны параметры кристаллических решеток твердых растворов, которые хорошо согласуются с литературными данными для базового сегнетомагнетика – незамещенного феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$ .

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что предлагаемый и использованный в данной работе метод синтеза замещенных сегнетомагнетиков является наиболее перспективным для получения однофазных беспримесных образцов твердых растворов на основе феррита  $\text{BiFeO}_3$ .

Исследована микроструктура синтезированных образцов замещенных сегнетомагнетиков, их магнитные свойства. Измерена их электропроводность в интервале температур от 300 до 1000 К, рассчитаны значения энергии активации электрической проводимости.

Результаты работы могут быть использованы при разработке материалов для электронной и химической промышленности, а также в приборостроении.

УДК 621.793

В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук; В.А. Ашуйко, доц., канд. хим. наук;  
Л.Н. Новикова, доц., канд. хим. наук; Н.О. Прокофьева, студ.;  
М.В. Шило, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **ВАНАДАТНО-МОЛИБДАТНАЯ ПАССИВАЦИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ**

Цель работы – изучение и сопоставление защитных свойств конверсионных покрытий, полученных из фосфато-молибдатных и ванадатно-молибдатных растворов, на гальванически оцинкованной стали.

Покрытия наносились на поверхность гальванически оцинкованной стали 08кп. Гальваническое цинкование производилось из аммикатного электролита цинкования с использованием блескообразующей композиции ЛГ-50. Пассивация проводилась из раствора, содержащего  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  (0,1 или 0,3 М),  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  или  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ . Содержание  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  или  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  в растворе поддерживалось таким, чтобы атомное отношение элементов Р или V к Мо составляло 0,66. Кислотность раствора поддерживалась на уровне pH 4,6 добавлением  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Условия пассивации: температура – 20 или 60 °С; время обработки – 1 или 3 мин. Таким образом, был составлен полный факторный эксперимент  $2^4$ , где на 2-х уровнях варьировались следующие факторы: концентрация  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  в растворе пассивации; вид второго компонента в растворе ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$  или  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ); температура и время пассивации. Исследование защитных свойств покрытий проводилось электрохимическим методом поляризационных кривых и испытаниями в камере солевого тумана (ГОСТ 9.308-85). Из поляризационных кривых были определены плотности тока коррозии, а по результатам испытаний в камере солевого тумана – степень повреждения поверхности коррозией.

Основные результаты: а) повышение температуры пассивации приводит к увеличению плотности тока коррозии и к повышению степени повреждения поверхности коррозией; б) влияние концентрации молибдата натрия на защитные свойства покрытий неоднозначно: плотность тока коррозии с увеличением концентрации молибдата натрия уменьшается, а степень коррозионных повреждений – увеличивается; в) эффект времени пассивации на защитные свойства конверсионных покрытий незначителен; г) использование  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  или  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  в качестве второго компонента практически не оказывает влияния на защитные свойства покрытий; д) время до появления белой коррозии на цинке для покрытий полученных из молибдатных растворов меньше 24 часов.

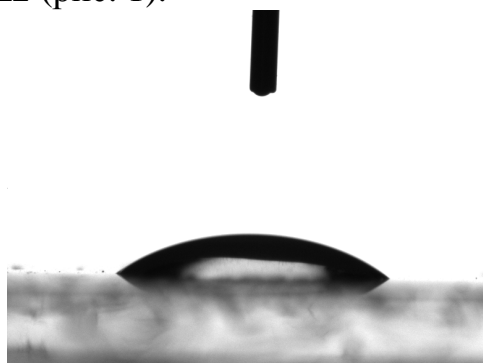
УДК 541.13:544.653:544.722.132

А.С. Письменская, асп., А.А. Черник, доц., канд. хим. наук  
(БГТУ, г. Минск);В.Д. Кошевар, проф., д-р хим. наук, зав. лаб. ХЛиВМ  
(ИОНХ НАН Беларуси, г. Минск)

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ АНОДИРОВАНИЕ АІ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время известно, что алюминиевые поверхности сами по себе обладают малым гидрофобным эффектом, однако в условиях продолжительного увлажнения и загрязнения поверхности происходит значительное падение водоотталкивающих свойств материала. В связи с этим необходимо введение дополнительных обработок поверхности изоляторов для создания прочного и долговечного гидрофобного покрытия. Решение данной проблемы может быть достигнуто с применением покрытий с высокой гидрофобностью на основе наноструктурированного алюминия, которое позволит значительно минимизировать отрицательное воздействие влаги и колебание температур, а также уменьшить вероятность налипания льда и снега на линии электропередач, повысить надежность работы подвижных частей механизмов.

Наноструктурированная поверхность алюминия получалась путем низкотемпературного анодирования в щавелевокислом электролите. Интервал температур составил 4 – 20°C, а напряжение варьировалось в диапазоне 40 – 60 В, также изменялось продолжительность процесса 5 – 20 минут. Количественным показателем гидрофобности являлся краевой угол смачивания, который для исходных алюминиевых образцов марки АД1Н, которые прошли предварительную подготовку, составил  $36^{\circ} \pm 2$  (рис. 1).

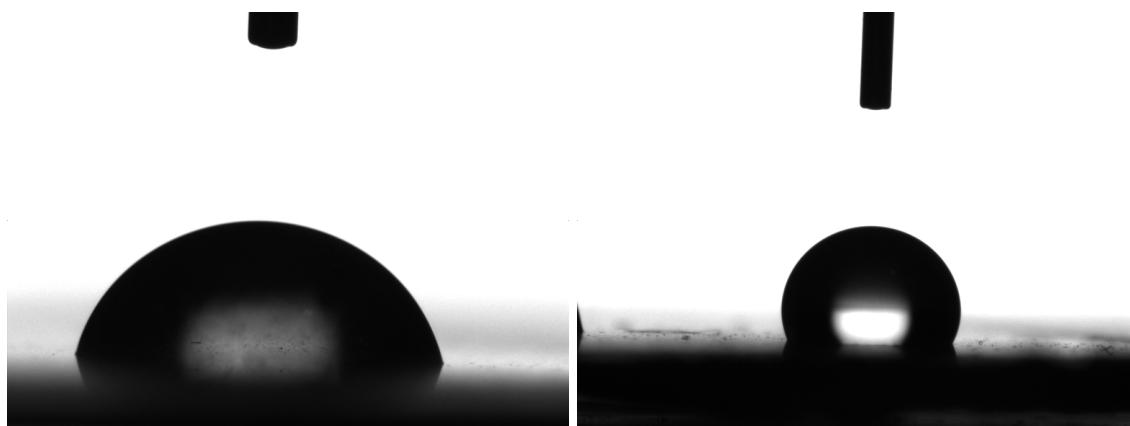


**Рисунок 1 – Микрофотография краевого угла смачивания  
на алюминии прошедшего предварительную подготовку**

Результаты исследования показали, что на значение краевого угла смачивания пористого анодного оксида алюминия оказывали



влияние температура, напряжение и продолжительность процесса анодирования. Увеличение напряжения, температуры и продолжительности процесса приводили к увеличению краевого угла смачивания. Например для образцов с режимом анодирования: напряжение 40В, температура 10°C, а продолжительность процесса анодирования составила 10 минут краевой угол смачивания равен 76,7° (рис. 2,а), а для другого процесса: напряжение 60 В, температура 20°C и время анодирования 5 минут – 117,2° (рис.2, б).



а

б

**Рисунок 2 – Микрофотографии краевого угла смачивания на анодированных образцах в щавелевокислом электролите: а –  $U = 40\text{В}$ ,  $T = 10^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 10$  минут; б –  $U = 60\text{В}$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 5$  минут**

По микрофотографиям полученных на сканирующем электронном микроскопе была выявлена следующая закономерность, что при увеличении продолжительности процесса, но при прочих равных условиях диаметр пор увеличивается, а так же структура поверхности становится более упорядоченной. Такая же зависимость наблюдается и при увеличении напряжения, но при других равных условиях.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что слой анодного оксида, образованный на поверхности алюминия, увеличил его гидрофобные свойства. По сравнению с исходными образцами краевой угол смачивания увеличился после наноструктурирования более чем в 3 раза.

УДК 532.135:531.212

О.А. Алисиенок, ст. преп., канд. хим. наук;  
А.Н. Мурашкевич, проф., д-р техн. наук;  
И.М. Жарский, проф., канд. хим. наук;  
В.Г. Шидловская, магистрант; М.С. Новицкая, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОЗОЛЯ ДИОКСИДА ТИТАНА**

Композиционные материалы на основе оксидов титана, алюминия, кремния, циркония наряду с высокой дисперсностью, термической стабильностью, развитым гидроксильным покровом способны эффективно катализировать ряд процессов органического синтеза [1], выполнять функции наполнителей электроореологических дисперсий [2], компонентов селективных сорбентов органо-минеральной природы [3].

Для синтеза гидрозолей диоксида титана нами использованы методы химического диспергирования предварительно синтезированного осадка гидратированного диоксида титана из водно-спиртовых растворов органических титансодержащих прекурсоров, а также водных растворов тетрахлорида титана.

Показано, что для пептизации диоксида титана могут быть использованы растворы азотной или хлороводородной кислот, соотношение  $H^+/Ti$  поддерживали в интервале от 0,2 до 1. Использование многоосновных кислот (серной, фосфорной), а также слабых одноосновных кислот (уксусной) не приводит к заметному изменению размера частиц диоксида титана, то есть процесс пептизации не протекает. Сушка гидрозолей диоксида титана позволяет получать порошки с содержанием твердой фазы до 70%, обладающие способностью к самопептизации в воде и получению золя с размером частиц 15–25 нм после вторичной пептизации.

Технология получения композита ядро  $SiO_2$  – оболочка  $TiO_2$  состоит в осаждении ядра диоксида кремния из растворов жидкого стекла в присутствии растворов карбоната аммония, синтезе золя диоксида титана вышеописанным методом. Заключительной стадией является формирование оболочки диоксида титана на частицах ядра диоксида кремния в контролируемых условиях pH дисперсионной среды. Показано, что введение ряда допирующих компонентов (Al, N, P) на заключительной стадии формирования композита позволяет увеличить константу скорости разложения раствора красителя Родамина FL–BM в условиях воздействия УФ-излучения на 40-60%, в условиях

естественного освещения константа скорости увеличивается в 1,4–2,6 раза.

Золь-гель технология ультра- и нанодисперсного наполнителя электрореологических дисперсий с модифицированной структурой для устройств гидроавтоматики включает: синтез золя диоксида титана с размером частиц 7–15 нм, смешение золя в заданной последовательности и соотношении с добавками в условиях ультразвукового диспергирования, сопровождающееся переходом золя в гель и протеканием химических превращений структурирующего компонента и модификаторов, СВЧ сушка промежуточного продукта с последующим измельчением в планетарной мельнице, термообработка высушенного и измельченного продукта в условиях неподвижного слоя. На этой стадии происходят процессы структурно-фазовых превращений основного, структурирующего компонентов и модификаторов с образованием модифицированного нанодисперсного продукта. Получаемый по данной технологии наполнитель обладает удельной поверхностью 70–110 м<sup>2</sup>/г, имеет структуру преимущественно анатаза с размером кристаллитов 10–15 нм и обеспечивает в составе 30–60 % по наполнителю ЭРД увеличение величины напряжения сдвига в 80–200 раз и плотности токов потребления 10–30 мкА/см<sup>2</sup> [2].

Технология получения органо-минеральных композиционных материалов включает смешение зольей соответствующих оксидов и введение растворов модифицирующих компонентов – краун-эфиров или подандов с последующей сушкой при 100–150°С. Показана эффективность формирования отпечатка катионов в адсорбенте на этапе золь-гель-синтеза, позволяющая увеличить адсорбцию соответствующего катиона на 20%. Найдены условия количественной адсорбции катионов La<sup>3+</sup>, Sr<sup>2+</sup> и Ba<sup>2+</sup> синтезированными композитами [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

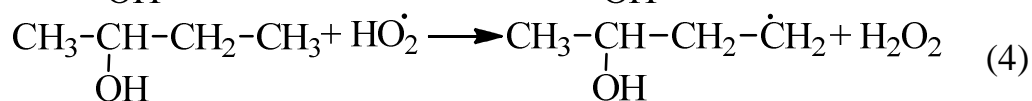
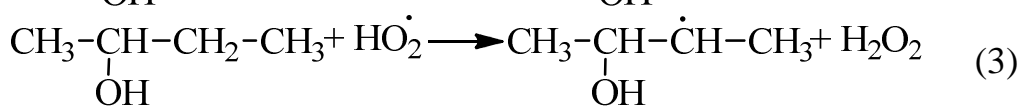
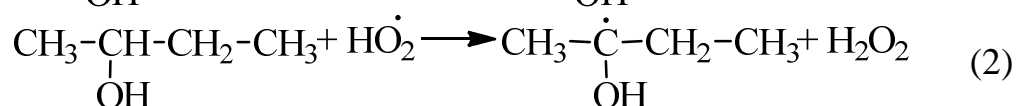
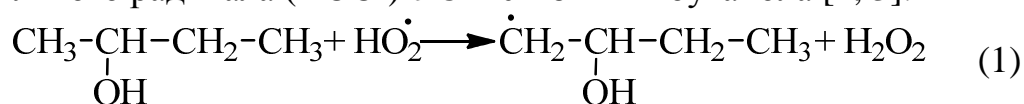
1. Titova Yu. Effect of nanosized TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> covalently modified by chiral molecules on the asymmetric Biginelli reaction // *Catalysis Today*. 2015. V. 241. P. 270–274.
2. Мурашкевич А. Н. Влияние условий получения наноразмерного диоксида титана, модифицированного алюминием, на эффективность его применения в электрореологических дисперсиях // *Коллоид. ж.* 2017. Т. 79. №1. С. 65–72.
3. Федорова О.В. Композиты краун-эфир-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> в процессах сорбции катионов щелочноземельных и редкоземельных металлов из кислых водных растворов // *Рос. хим. ж.* 2015. Т. LIX. №№ 5–6. С. 92–97.

Ю.В. Непомнящих, доц.; С.В. Пучков  
(ФГБОУ «Кузбасский государственный технический университет  
им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия)

### РАСЧЕТ ЭНЕРГИЙ АКТИВАЦИИ РЕАКЦИЙ РАДИКАЛА НОО• С СН-СВЯЗЯМИ 2-БУТАНОЛА

Наряду с прочими кислородсодержащими органическими соединениями, применяемыми в качестве высокооктановых присадок к моторным топливам, все большее значение приобретает использование 2-бутанола [1].

Состав продуктов глубокого окисления 2-бутанола в двигателях внутреннего сгорания определяется направленностью первичной атаки пероксильными радикалами молекулы спирта [2], причем в условиях горения топлива наибольшее значение имеют реакции гидропероксильного радикала (НОО•) с СН-связями 2-бутанола [1, 3]:



Энергии активации реакций (1-4) рассчитывали, как разность полных энергий переходного состояния и исходных веществ [4]. Оптимизацию геометрических параметров исходных соединений, решение колебательной задачи, поиск переходных состояний по алгоритму Берни, релаксированное сканирование по внутренней координате реакции проводили методом функционала плотности (DFT) с гибридным функционалом B3LYP в базисе 6-311++G(d,p) [4,5].

Получены значения энергий активации реакций 1, 2, 3 и 4 соответственно, кДж/моль: 77.03, 37.80, 65.56 и 73.69. Значительное отличие (приблизительно в 2 раза) энергии активации реакции (2) от энергий активации реакций (1, 3, 4) показывает, что из параллельных реакций (1-4) предпочтительной является реакция (2). Такое заключение подтверждается экспериментальными данными. Так известно, что при жидкофазном окислении 2-бутанола при 60 °С подавляющее количество продуктов образуется при взаимодействии пероксильных ради-

калов с СН-связью спирта в положении 2 по реакции типа (2) [2]. При увеличении температуры вклад параллельной реакции (2) с самым низким значением энергии активации должен снижаться, а вклад параллельных реакций (1, 3, 4) с более высокими энергиями активации должен увеличиваться. Поэтому можно ожидать, что при достаточно высоких температурах в условиях сгорания топлива в двигателях суммарный вклад реакций (1, 3, 4) может быть соизмерим с вкладом реакции (2). Для подтверждения таких предположений требуется проведение дополнительных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, Y. Enhancing bio-butanol production from biomass of *Chlorella vulgaris* JSC-6 with sequential alkali pretreatment and acid hydrolysis / Y. Wang [and ets] // *Bioresource Technology*. – 2016. – V. 200. – P. 557-564.
2. Пучков, С.В. Реакционная способность СН-связей 2-бутанола в процессе жидкофазного окисления / С.В. Пучков, Ю.В. Непомнящих // *Журн. Физ. Химии*. – 2017. – Т.91. – №12. – С. 2050-2056.
3. Пучков, С.В. Оценка энергий разрыва СН-связей 2-бутанола квантово-химическими методами / С.В. Пучков, Ю.В. Непомнящих // *Вестн. КузГТУ*. – 2017. – № 4. – С. 176-181.
4. Хурсан, С.Л. Влияние природы diaзосоединений и олефинов на протекание реакций 1,3-диполярного циклоприсоединения / С.Л. Хурсан, А.Б. Самаркина // *Вестн. Башкирского университета*. – 2008. – Т.13. – №3(1). – 780-783.
5. Чиркина, Е.А. Квантово-химическое изучение механизмов органических реакций VI. О взаимодействии 1,2-этандитиола с винилденхлоридом / Е.А. Чиркина, Е.П. Леванова, Л.Б. Кривдин // *Журнал органической химии*. – 2017. – Т. 53. – № 7. – 974-983.

УДК 64.011.5

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
М.Л. Хейфец, проф., д-р техн. наук (НАН Беларуси, г. Минск);  
С.Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук (ВГУИТ, г. Воронеж);  
С.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

### **УЧЕТ ЭФФЕКТА ГЛУБОКОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Эффект глубокой отрицательной обратной связи заключается в анализе поведения систем, у которых при большом коэффициенте передачи в прямой цепи возникает эффект исчезновения в эквивалентной характеристике всей системы характеристик объекта управления. Из-за особенности описания объектов с замкнутой обратной связью эквивалентная передаточная функция представляет собой единицу, поделенную на передаточную функцию в цепи обратной связи. Этот эффект был обнаружен еще в 30-х годах 20-го столетия Блеком, Найквистом и Боде в лаборатории Бэлл Телефон.

В настоящее время эффект глубокой обратной связи используется в системах управления, регулятор которых реализует двух- (трех-) позиционный закон управления. В этом случае для перевода в линейную форму представления функции используется линеаризация релейной характеристики регулятора, которая, как известно, обладает большим коэффициентом усиления. Таким образом, в современных недорогих системах управления тепловыми объектами выполняются все условия для возникновения эффекта глубокой обратной связи.

Однако при исследовании поведения систем с глубокой обратной связью необходимо учитывать, что при неограниченном росте коэффициента передачи в прямой цепи вся система теряет устойчивость. Таким образом, синтез системы управления устойчивым тепловым объектом должен учитывать возможность неустойчивого поведения системы. Простейшим способом устранить эффект является использование дискретных релейных законов регулирования, которые позволяют реализовать большие, но ограниченных по величине коэффициентов усиления а прямой цепи.

УДК 519.2

А. В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БГУ, г. Минск);

О. Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск),

**СГЛАЖЕННАЯ ГИСТОГРАММНАЯ ОЦЕНКА  
ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
НЕЧЕТКОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ  
ИНТЕРВАЛУ ГРУППИРОВАНИЯ**

Популярность гистограммной оценки плотности распределения вероятности в значительной степени объясняется ее простотой. В то же время эта оценка обладает существенной субъективностью в определении числа интервалов группирования данных, полученных в ходе измерительного эксперимента. Известно большое количество эмпирических и «сконструированных» формул, определяющих число интервалов в зависимости от числа наблюдений, коэффициента эксцесса, принадлежности плотности определенному классу распределений. В частности, в ГОСТ Р 50.1.033-2001 «Прикладная статистика» приводятся весьма общие рекомендации апеллирующие к практическому здравому смыслу.

В целях решения задачи оценивания плотности вероятности гистограммным методом, вместо единичной функции включения данных при подпадании их в интервал  $\tilde{g}_j = \sum_i I_{[x_i \in A_j]}$ , предлагается

рассматривать функцию принадлежности данных этому интервалу, т.е.  $g_j = \sum_i \mu_j[x_i]$ , где  $\mu_j[x_i]$  – функция принадлежности  $i$ -того

данного измерительного эксперимента  $j$ -тому интервалу группирования. На функцию принадлежности должны быть наложены ограничения, обеспечивающие условия нормировки:  $\sum_j \mu_j[x] = 1$  и

$\sum_j \sum_i \mu_j[x_i] = N$ , где  $N$  – общее число данных измерительного

эксперимента. Полученная таким образом частотная оценка  $p_j = g_j / N$  в отличие от оценки  $\tilde{p}_j = \tilde{g}_j / N$  является сглаженной.

Эффективность такой гистограммной оценки плотности можно охарактеризовать коэффициентом сглаживания  $K_{cgl} = \frac{1}{m} \sum_j (g_j - g_{j+1})^2$ ,

который оценивает «изрезанность» гистограммы. Отметим, программно-аппаратная реализация предлагаемого подхода не представляет сложности.

УДК 64.011.5

Т.А. Мозоль, магистрант (БГТУ, г. Минск);%  
Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Системы, состояние которых описывается функциями нескольких аргументов, зависящими как от времени, так и от пространственных координат, получили название систем с распределенными параметрами (СРП), или, короче, распределенных систем. Основные особенности систем с распределенными параметрами (СРП):

Состояние СРП, определяемое функцией нескольких переменных, описывается, дифференциальными уравнениями не в обыкновенных, а в частных производных (содержащими производные функции состояния как во времени, так и по пространственным координатам), интегральными уравнениями, а также "гибридными" системами уравнений различной природы, включая в качестве дополнительных соотношений и обыкновенные дифференциальные уравнения.

Расширяется класс управляющих воздействий, прежде всего за счет возможности включения в их число пространственно-временных управлений, описываемых подобно управляемому состоянию СРП, функциями нескольких аргументов - времени и пространственных координат.

Указанные выше особенности приводят к необходимости далеко не тривиальных обобщений важнейших категорий теории управления на случай систем с распределенными параметрами и по существу требуют создания нового аппарата для их анализа и синтеза на базе нетрадиционных для теории управления математических средств.

Задача реализации систем управления объектами с распределенными параметрами резко усложняется за счет необходимости осуществления пространственно-распределенного контроля состояния объекта в целях наблюдения за результатами процесса управления и использования соответствующих сигналов обратных связей, так и за счет необходимости построения регуляторов с пространственно-распределенными управляющими воздействиями. При этом потенциальные возможности систем управления за счет роста количества обратных связей и потенциально управляющих воздействий, существенно повышаются по сравнению даже с многосвязными системами управления.



УДК 611.53

С.Г. Тихомиров, Ю. В. Пятаков, А.А. Маслов, Е.Э. Холева  
(ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий», Россия)

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ

Информационная модель исследуемого процесса, представленная на рис.1 предназначена для выполнения следующих функций:

- моделирование кинетики и термодинамики процесса вулканизации, расчета показателей качества готовых изделий;
- накопление статистических данных о процессе вулканизации и качестве получаемых продуктов;
- идентификация параметров динамических и статических моделей;
- расчет управляющих воздействий и выработка рекомендаций по управлению процесса вулканизации для получения продукции заданного качества.



Рисунок 1 – Информационная модель процесса

Особенностью рассматриваемой информационной системы является то, что она функционирует в нескольких режимах: 1 – режиме моделирования кинетики процесса; 2 - режиме моделирования термодинамики процесса; 3 - режиме идентификации параметров математических моделей процесса; 4 - режиме расчета управляющих воздействий; 5 - режиме накопления статистических данных. В зависи-

мости от того, какую информацию использует исследователь, выбирается соответствующий режим.

Объект исследования является слабоструктурированным, поскольку содержит как качественные элементы (эластомеры, наполнители, условия проведения процесса) так и мало изученные (многокомпонентные структурирующие системы, неконтролируемые возмущения), которые имеют тенденцию доминировать. В состав общей структуры входят элементы, которые необходимо теоретически обосновать (кинетическая модель, процессы тепломассопереноса, оптимизация режимов, процессы переработки).

Анализ общей структуры показал, что механические свойства вулканизатов определяются химическими реакциями макромолекул с вулканизирующими агентами, а для оценки параметров пространственной сетки вулканизатов необходимо разработать специальное математическое и алгоритмическое обеспечение.

В результате проведенной стратификации изучаемого объекта выделены следующие основные подсистемы: 1) анализа и учета термофлуктуационных явлений, обеспечивающих ускорение протекания химических реакций; 2) кинетическая модель вулканизации; 3) оптимизация режимов вулканизации, обеспечивающая получение требуемых механических свойств.

С. Г. Тихомиров<sup>1</sup>, проф. д-р техн. наук;  
С. Л. Подвальный<sup>2</sup>, проф. д-р техн. наук;  
А. В. Карманов<sup>2</sup>, асп.  
(<sup>1</sup>ВГУИТ, <sup>2</sup>ВГТУ, г. Воронеж)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРОВ

Деструкция сшитых полимеров применяется для переработки изделий на их основе с целью утилизации и позволяет не только вернуть ценное углеводородное сырье в новый технологический цикл производства полимерных изделий, но и уменьшить энергетические, временные затраты, повысить экологическую безопасность. Одним из способов утилизации является регулируемая деструкция полимеров, которая может быть достигнута установлением закономерностей и подбором оптимальных условий процесса.

В работе на основе экспериментального исследования процесса радиационной деструкции предельных полимеров получено математическое описание изменения его пласто-эластических свойств и структурных параметров от условий облучения во времени. Предложенное математическое описание связывает управляемые и управляющие параметры - исходную, текущую, предельную вязкость, дозу облучения, концентрацию образовавшихся макрорадикалов, константы скорости деструкции на разных этапах процесса. Принято, что акт деструкции происходит равновероятно в произвольной точке  $x$  полимерной цепи  $l$ . Определена вероятность взаимодействия и функция распределения полимерных молекул, подвергшихся деструкции.

В соответствии с кинетической схемой химических реакций, протекающих при деструкции, предложена зависимость описания динамики изменения вязкости по Муни полимера в процессе его деструкции для установления связи между текущим значением этого показателя и величинами констант скоростей химических реакций, протекающих в течение этого процесса ( $k_1$  и  $k_2$ ) при заданных условиях. Оценка параметров  $k_1$  и  $k_2$  осуществлялась с помощью модернизированного метода покоординатного спуска по критерию минимума средней относительной приведенной погрешности отклонений и расчетных значений вязкости по Муни от экспериментальных. Погрешность вычислений по предложенной модели составила 4-7 %. Полученные зависимости могут быть использованы при создании полимерных композиций с регулируемыми свойствами.

Н. В. Суханова, доц., канд. техн. наук;  
Ю. Е. Кожевников, инж.; К. В. Дугина, студ.  
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж)

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ И ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТБОРА БИОМАССЫ

Рассмотрим математическую модель процесса в виде [1, 2, 3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta \frac{dX}{dt} = \theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot K_4 \cdot X^{2(i)} - \theta \cdot \frac{F}{V^{(i)}} \cdot X^{(i)} + (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_1}{dt} = -\frac{\theta}{Y_{X/S_1}} \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot m \cdot X^{(i)} + \\ + \theta \cdot \frac{F_1}{V^{(i)}} \cdot (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_2}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{02} + \frac{(\alpha_{m2} - \alpha_{02}) \cdot S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_2}{V^{(i)}} \cdot (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_3}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m3} - \alpha_{03}) \cdot S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_3}{V} \cdot (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\ F = F_1 + F_2 + F_3; \\ \theta \frac{dT}{dt} = T^{(i)} + T_b^{(i)} + \theta \cdot \varphi^{(i)} \cdot a_0 \cdot (X^{(i)} - X^{(i-1)}) \cdot V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{воз}} \cdot \Delta I. \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\mu_m$  - максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $K_1, K_2, K_3, K_4, Y_{X/S_1}, K_5, K_6$  - коэффициенты;  $\alpha_0$  и  $\alpha_m$  - минимальное и максимальное содержание элемента в биомассе для минеральных субстратов;  $X, S_1, S_2, S_3$  - концентрации биомассы, углеводов, азота и фосфора соответственно;  $V$  - объем жидкости;  $F$  - объемная скорость подачи питательных веществ;  $F_1, F_2, F_3$  - объемные скорости подачи мелассы, сульфата аммония и диаммонийфосфата;  $S_{01}, S_{02}, S_{03}$  - концентрации сахаров, азота и фосфора в подпитке;  $m$  - скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности;  $\theta$  - время роста микроорганизмов в аппарате;  $a_0$  - коэффициент удельного тепловыделения дрожжей;  $G_{\text{воз}}$  - массовый расход воздуха;  $\Delta I$  - приращение теплосодержания воздуха;  $G_{\text{в}}^{\text{OX}}$  - массовый расход воды на охлаждение;  $C_{\text{в}}$  - удельная теплоемкость воды;  $T$  - температура культуральной среды в аппарате;  $T_{\text{в}}$  - температура воды в рубашке аппарата.

Для определения оптимального значения концентрации микроорганизмов и величины оптимального отбора биомассы, необходимо по ходу процесса культивирования определять численные значения коэффициентов модели  $\varepsilon$  и  $\beta$  ( $\frac{dX}{dt} = [\varepsilon - \beta \cdot X] \cdot X$ ). Анализ модели (1), показы-

вает, что коэффициенты  $\varepsilon$  и  $\beta$  можно выразить следующим образом [1]:

$$\varepsilon = \left( \mu - \frac{F}{V} + \frac{1}{\theta} \right), \quad \beta = K_4. \quad (2)$$

Расчет значений  $\varepsilon$  и  $\beta$  необходимо производить по ходу процесса, используя систему уравнений (1). Отбор биомассы из аппарата начинается при достижении текущей концентрации  $X$  уровня  $\frac{\varepsilon}{2\beta}$ . Для определения объема биомассы, отбираемой из аппарата, используется выражение:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X^{(i)} - K_4 \cdot X^{(i)2} - \frac{F}{V} \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta} (X^{(i)} - X^{(i-1)}).$$

При условии, что весь прирост биомассы должен быть отобран во время отбора, можно записать [1]:

$$u = \frac{dX}{dt}. \quad (3)$$

Принимая во внимание нулевые начальные условия, т. е.  $X^{(i-1)} = 0$ , объем отбираемой биомассы определяется как [1]:

$$V_{\text{от}} = \frac{F}{\frac{u}{X^{(i)}} - \mu + K_4 \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta}}. \quad (4)$$

На основе описанной выше методики была разработана АСУ отбором биомассы дрожжей из аппарата по ходу процесса культивирования [1]. Анализ результатов показывает, что использование такой системы в процессе управления дрожжевым производством позволяет снизить время культивирования на 1 час. Оптимальная концентрация  $X = 59$  кг/м<sup>3</sup>, время отбора  $t'$  - начало 6 часа; время культивирования -  $t_k = 12$  ч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев В. В., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Одно решение задачи кинетики роста микроорганизмов // Проблемы химии и химической технологии: тез. докл. 2-ой региональной научной конференции. Тамбов, 1994. С.126 - 127.
2. Авцинов И. А., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов // Вестник ТГТУ, 2017. Т.23. № 3. - С.481 - 487.
3. Голубкина, Н. В. Математическая модель полупериодического процесса ферментации биомассы микроорганизмов/ Н. В. Голубкина, Л. С. Гордеев, В. В. Ануфриев, Г. И. Щепкин, С. Г. Тихомиров // Информационные технологии и системы. Технологические задачи механики сплошных сред: тез. докл. республ. конф. - Воронеж: Воронеж. гос. ун - т, 1992. - С. 50.

## **MODELING THE CONTINUOUS VARIABLE TRANSMISSION SYSTEM**

A continuously variable transmission, or CVT, is a type of automatic transmission that provides more useable power, better fuel economy and a smoother driving experience than a traditional automatic transmission.

Conventional automatic transmissions use a set of gears that provides a given number of ratios (or speeds). The transmission shifts gears to provide the most appropriate ratio for a given situation: Lowest gears for starting out, middle gears for acceleration and passing, and higher gears for fuel-efficient cruising.

The CVT replaces the gears with two variable-diameter pulleys, each shaped like a pair of opposing cones, with a metal belt or chain running between them. One pulley is connected to the engine (input shaft) and the other to the drive wheels (output shaft). The halves of each pulley are movable; as the pulley halves come closer together the belt is forced to ride higher on the pulley, effectively making the pulley's diameter larger.

Changing the diameter of the pulleys varies the transmission's ratio (the number of times the output shaft spins for each revolution of the engine), in the same way, that a 10-speed bike routes the chain over larger or smaller gears to change the ratio. Making the input pulley smaller and the output pulley larger gives a low ratio (a large number of engine revolutions producing a small number of output revolutions) for better low-speed acceleration. As the car accelerates, the pulleys vary their diameter to lower the engine speed as car speed rises.

This is the same thing a conventional transmission does, but instead of changing the ratio in stages by shifting gears, the CVT continuously varies the ratio -- hence its name.

To describe CVT systems, it is necessary to use a system of ordinary differential equations with a special right-hand side, which can be elements of nonlinearity in describing limitations on the functioning of a mechanical system.

М. А. Анкуда, ассист.;  
С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

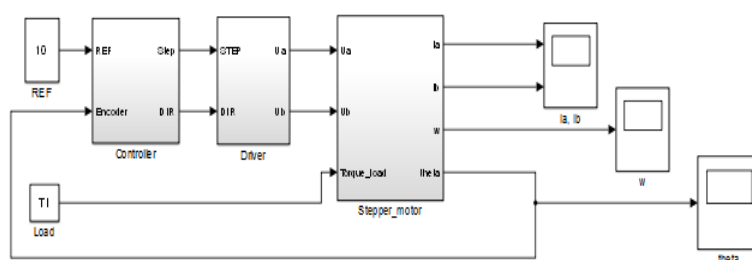
## ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВодОВ РАБОЧИХ МЕХАНИЗМОВ 3D-ПРИНТЕРА

В 3D-принтере траекторию движения головки экструдера необходимо отслеживать относительно трех координатных осей, что требует одновременного использования не менее трех приводных устройств. При этом точность перемещения можно обеспечить увеличением возможного количества дискретных положений управляемого элемента на протяжении всей траектории следования либо непрерывным отслеживанием его положения с помощью различных средств измерения и созданием обратных связей по положению.

Как правило, в состав привода входят следующие датчики: энкодер, который служит для определения положения и скорости вращения устройства; датчик тока, который обеспечивает высокие динамические характеристики; датчик напряжения для обеспечения безопасного торможения. Сигнал обратной связи по положению используется, чтобы остановить двигатель в тот момент, когда непосредственно ротор приблизится к необходимому угловому положению.

Регулирование обычно осуществляется классическим ПИД-законом управления. Однако, если использовать ПИ-регулятор, построенный на основании теории нечеткого множества, то можно обеспечить лучшее управление. Даже не зная настроек системы можно реализовать хороший регулятор на нечеткой логике, который будет основан на опыте предыдущего контроля позиции.

Для реализации численного моделирования в пакете Matlab/Simulink была создана структура замкнутой системы управления с контролем и регулированием положения ротора шагового двигателя на основе нечеткой логики (рис. 1).



**Рисунок 1 – Замкнутая структура системы  
управления шаговым двигателям**

М. А. Анкуда, ассист.;

С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА 3D-ПРИНТЕРА

Для создания математической модели шагового двигателя (ШД) необходимо составить уравнения электрического равновесия для напряжений контуров тока, уравнения моментов, действующих на ротор, а также уравнение электромеханического преобразования энергии.

Исходя из законов Кирхгофа для схемы замещения ШД, запишем уравнения электрического равновесия напряжений и ЭДС обмоток статора:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_2}{dt} - E_1 \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} - E_2 \end{cases} \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение фаз;  $R$  – активное сопротивление фаз;  $I_1, I_2$  – токи фаз 1 и 2, соответственно;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность обмоток фаз;  $E_1, E_2$  – наведенные ЭДС в катушках фаз 1 и 2, соответственно.

Наведенная ЭДС в катушке фазы 1 определяется следующим выражением:

$$E_1 = \omega \cdot p \cdot \Psi_m \sin(p \cdot \theta), \quad (2)$$

где  $\omega = d\theta/dt$  – угловая скорость вращения ротора;  $p$  – число зубцов ротора;  $\Psi_m$  – максимальное потокосцепление;  $\theta$  – положение ротора.

Аналогично для фазы 2:

$$E_2 = \omega \cdot p \cdot \Psi_m \sin(p \cdot \theta - \lambda), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – угол сдвига фаз.

Электромагнитный момент, создаваемый обмотками фаз статора можно определить следующим выражением:

$$M_{эм} = -\Psi_m \cdot I_1 \cdot \sin(p\theta) + \Psi_m \cdot I_2 \cdot \cos(p\theta). \quad (4)$$

Уравнение моментов, действующих на ротор:

$$\frac{J_{\Sigma}}{p} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\theta}{dt} = M_{эм} - M_H, \quad (5)$$

где  $J_{\Sigma} = J_r + J_H$  – суммарный момент инерции ротора двигателя и нагрузки, приведенный к валу ротора;  $D$  – коэффициент вязкого трения;  $M_H$  – момент сопротивления нагрузки.

Уравнения 1-5 являются нелинейными дифференциальными уравнениями, которые описывают динамические режимы работы ШД.



М. А. Анкуда, ассист.;  
С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В SIMULINK ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Система уравнений математической модели шагового электропривода в динамическом режиме является системой нелинейных дифференциальных уравнений. Следовательно, требуется использование численных методов решения. Для этого представим каждое уравнение в виде блоков с заданными функциями в пакете Simulink.

Полученные три структурные модели для производных токов и скорости образуют модель шагового двигателя, который имеет в качестве входных параметров напряжения фаз и момент нагрузки. В качестве выходных переменных были выбраны токи фаз, скорость вращения ротора и угол положения. Структурная схема представлена на рис. 1.

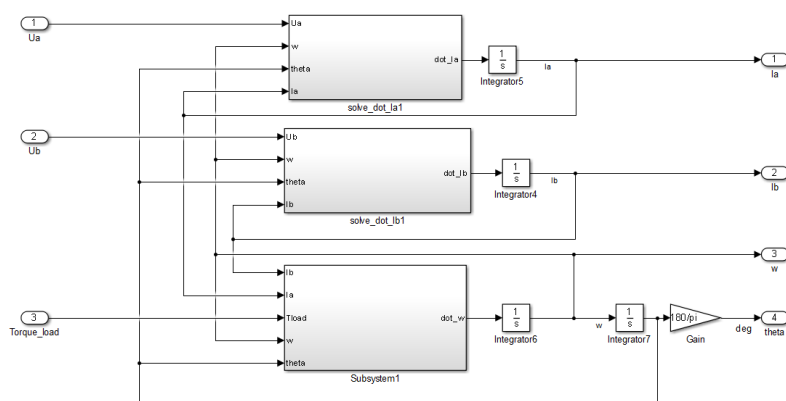


Рисунок 1 - Модель шагового двигателя в Simulink

Данную структурную схему можно представить как систему уравнений в пространстве состояний, которая описывает динамические режимы гибридного шагового двигателя:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & -p \cdot \Psi_m \sin(p\theta) & 0 \\ 0 & -R/L & p \cdot \Psi_m \cos(p\theta) & 0 \\ -\Psi_m \sin(p\theta) & \Psi_m \cos(p\theta) & -D/J_\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ U \\ D \\ 0 \end{bmatrix}$$

УДК 681.532.8:621.391

Д. С. Карпович зав.каф., доц., канд. техн. наук;

И.О. Оробей доц., канд. техн. наук;

В. В. Сарока доц., канд. техн. наук; А.Р. Челянов (БГТУ, г. Минск)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА**

Наведение устройств и систем, устанавливаемых на подвижные и стационарные объекты, осуществляется посредством автоматизированных гиростабилизированных опорно-поворотных устройств (ГОПУ), требующих систему управления, обеспечивающую прецизионную точность наведения. При рассмотрении в качестве объекта управления ГОПУ, фиксирующего отслеживаемый объект в пределах прямой видимости оптического измерителя, необходимо учитывать, что на точностные характеристики системы управления ГОПУ влияют: максимальная угловая скорость и ускорение изменения направления на объект относительно носителя ГОПУ с оптическим измерителем; частота формирования координат положения объекта; частота дискретизации информации об углах поворота рамок карданного подвеса; ширина поля зрения оптического измерителя; точность вычисления координат центра объекта применяемыми методами обработки измерения расстояния и положения объекта; величина времени запаздывания в контуре управления, которая обусловлена временем, затрачиваемым на обработку и вычисления; алгоритм формирования управления приводами исполнительного устройства ГОПУ; передаточная функция исполнительного устройства (приводов подвеса); вероятность и длительность возможного пропадания информации о положении объекта.

Анализ поведения САУ сервоприводами ГОПУ проводился с учетом динамических характеристик первичных измерительных преобразователей для модели привода с использованием двигателя постоянного тока. Результаты моделирования динамических характеристик системы автоматического управления сервопривода ГОПУ продемонстрировали целесообразность использования трехкоординатных МЕМС гироскопов и датчиков Холла в качестве первичных измерительных преобразователей. Они должны быть включены в систему управления, в которой быстрый контур использует данные датчика МЕМС гироскопа. Однако особенности метрологических характеристик МЕМС гироскопов требуют введения поправки. Для коррекции целесообразно применить медленный контур, который должен проводить коррекцию положения относительно магнитного поля земли по датчику Холла.

УДК 621.3.016.31

Д. С. Карпович зав.каф., доц., канд. техн. наук;  
М. Ю. Подобед асист.; В. В. Сарока доц., канд. техн. наук;  
А. В. Пеховский (БГТУ, г. Минск)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ И НА ПРОИЗВОДСТВЕ**

Современные системы автоматического управления на основе электропривода используют преобразователи частоты (ПЧ). Вследствие чего возникает потребность в подготовке специалистов, владеющих навыками подключения, настройки и эксплуатации данного вида оборудования. Одним из производителей ПЧ является ООО «ИЭК ХОЛДИНГ», который специализируется на выпуске оборудования для систем автоматизации. На основе оборудования ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» -преобразователей частоты ONI M680 и ONI A400 разработан лабораторный стенд, позволяющий получить навыки по вводу в эксплуатацию ПЧ, с учетом указаний по технике безопасности и условий установки преобразователя частоты. При проведении занятий студент осуществит проверку соответствия компонентов, правильности подключения двигателя. Научится составлять схемы электрических соединений и на практике реализовать электрические соединения и подключения, изучит алгоритмы настройки параметров и освоит навыки эксплуатации с использованием панели управления. Примеры эксплуатации электроприводов с ПЧ рассматриваются на основе следующих типичных алгоритмов подключения и настройки:

1. Управление асинхронным двигателем привода вентилятора от встроенного потенциометра или от внешнего потенциометра. Реализация функций «пуск, реверс, стоп» с использованием встроенного пульта управления;

3. Дистанционное управление асинхронным двигателем. Функции «пуск, реверс, стоп». Ступенчатое изменение скорости, с использованием цифровых входов;

4. Дистанционный «пуск, реверс и стоп» асинхронного двигателя привода вентилятора, задание скорости с использованием внешнего потенциометра или унифицированного аналогового сигнала тока 4-20 мА.

5. Изменение скорости асинхронного двигателя (повышение/понижение) дистанционно от кнопок. Реализация функций «пуск, реверс, стоп» с использованием встроенного пульта управления;

Практическое изучение способов установки, подключения и настройки преобразователей частоты позволит повысить компетенции будущих специалистов в области автоматизации.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОС-УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

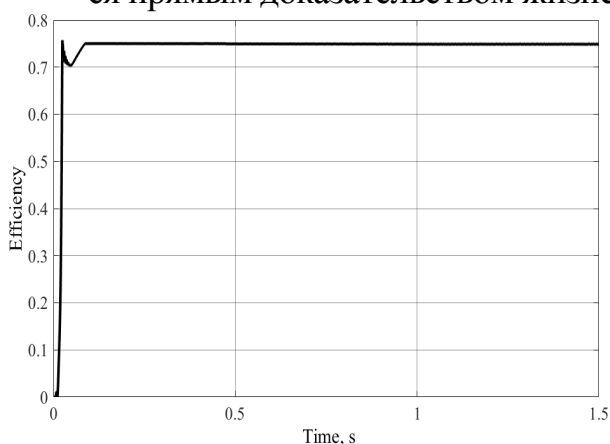
В большинстве случаев на гальваническом производстве в качестве основной системы управления скоростью робота манипулятора используют скалярную систему. Используя такой метод регулирования скорости, возникает проблема неполноценного использования ресурсов электродвигателей автооператора, потому что скорость вращения двигателей непосредственно зависит от частоты питающей сети.

При использовании векторного управления, а именно ФОС-управления (Field Orientation Control), скорость не зависит от частоты питающей сети. Данный параметр можно задать искусственно, повышая производительность автооператора.

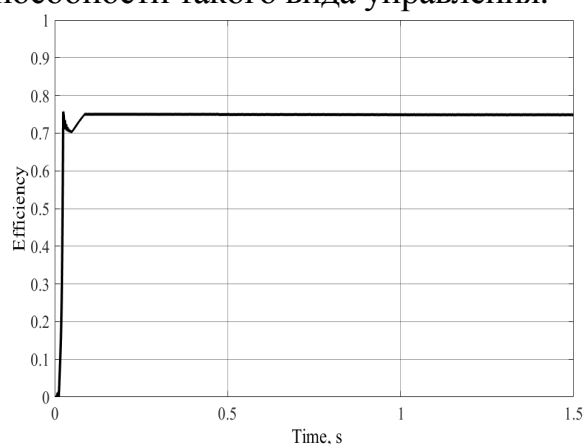
Используя имеющиеся результаты и наработки в направлении векторного управления можно синтезировать ФОС-управления в Simulink. В структурную схему входят блоки преобразования Парка и Кларка, регулятор потокосцепления ротора, регулятора скорости, обратного преобразования Парка и Кларка, а также триггеров сравнения результатов с регуляторов для получения управляющего сигнала.

В результате моделирования системы был получен график КПД двигателя и осуществлено сравнение с графиком КПД двигателя при скалярном управлении (рис. 1 и рис. 2).

Как видно из графиков КПД двигателя возросло на 10%, что является прямым доказательством жизнеспособности такого вида управления.



**Рисунок 1 - График КПД АД  
с ФОС-управлением**



**Рисунок 2 - График КПД АД  
со скалярным управлением**

УДК 681.51

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук; М.Ю. Подобед, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **БЛОК НЕЧЕТКОЙ СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ**

В контур системы автоматического управления температурой в помещении встраивается блок нечеткой селекции (БНС), на вход которого подаются сигналы от датчиков температур на рабочих местах в помещении. Обработывая входные сигналы по нечеткому алгоритму, БНС формирует эквивалентный выходной сигнал обратной связи, который подается на вход регулятора температуры.

В БНС вычисляются сигналы рассогласований между заданными и действительными значениями температур на рабочих местах для каждого канала обратной связи. Если рабочие места, в которых происходит измерение температур, находятся в одном помещении, а категории выполняемых работ по уровню энергозатрат относятся к одной и той же категории, то желаемое значение температур для всех рабочих мест может иметь одинаковое значение. Вычисленные сигналы рассогласования для всех каналов обратных связей подвергаются фазификации (вычислению соответствия между численными значениями сигналов рассогласования и значением функций принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной). Далее, по заранее определенным правилам нечеткого вывода в БНС происходит процедура определения истинности каждого из правил нечеткого вывода (агрегатирование), и нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечеткого вывода (активация). На стадии аккумуляции происходит нахождение функции принадлежности для выходной лингвистической переменной «эквивалентный сигнал рассогласования», которое преобразуется в четкий выходной сигнал (дефазификация).

В зависимости от целей, преследуемых системой автоматического управления температурой в помещении, могут подвергаться изменению формы функций принадлежности входных сигналов рассогласований, и выходного эквивалентного сигнала рассогласования, численные диапазоны значений функций принадлежности, правила нечеткого вывода и дефазификации.

УДК 004.94

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук; М.Ю. Подобед, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

В составе большинства систем кондиционирования воздуха ключевую роль играют калориферные установки. При помощи данных аппаратов регулируется температура воздуха в помещении. При математическом моделировании систем кондиционирования воздуха нельзя пренебрегать нелинейными свойствами калориферных установок, так как это неминуемо приведет к неадекватности получаемой модели и к неточностям синтезируемой системы автоматического управления.

Учитывая большое количество разновидностей калориферов, разнообразие схем реализации систем кондиционирования воздуха и способов управления теплоотдачей, в работе были выделены основные виды возмущающих и управляющих воздействий для систем кондиционирования воздуха. На основании структурной схемы обобщенной системы кондиционирования приточного воздуха составлены системы уравнения тепло- и массового баланса теплоносителя и воздуха, наиболее точно отражающие все происходящие процессы. Были показаны свойства калориферных установок, которые динамически меняются во времени в широком диапазоне регулирования расхода теплоносителя в трубках теплообменника. Также сформированы рекомендации по выбору способа гидравлической обвязки калорифера в системах кондиционирования воздуха с точки зрения улучшения настройки регулятора и увеличения точности работы системы автоматического управления.

Характеристики калорифера в системе кондиционирования воздуха будут меняться при различных расходах теплоносителя и температуре наружного воздуха. Независимо от всеобщую распространенность калориферов в системах кондиционирования воздуха в помещениях и упрощенное математическое описание, для синтеза адекватной системы управления необходимо учитывать явно нелинейные, динамически изменяющиеся во времени параметры калорифера. Данное обстоятельство должно носить обязательный характер в тех случаях, когда математическая модель не носит концептуальный теоретический характер, а требуется практическая апробация на объекте с широким диапазоном регулирования теплопроизводительности системы.

УДК 681.51

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук; М.Ю. Подобед, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРЕДПОСЫЛКИ К СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ПО НЕСКОЛЬКИМ КАНАЛАМ**

В силу дешевизны и простоты реализации наиболее распространёнными системами управления кондиционированием воздуха являются схемы с расположением нескольких датчиков температуры в контрольных точках помещения. При такой схеме управления контроллер высчитывает и обрабатывает усредненное значение температуры в помещении. Подобные схемы обладают следующими существенными недостатками:

1) возможны такие режимы работы системы управления, при которых в одной части помещения возможен локальный недогрев воздуха, а в другой части — перегрев, в то время, как усреднённое значение температуры останется в допустимом диапазоне;

2) с увеличением количества точек измерения температуры воздуха в помещении, происходит нивелирование частных значений сигналов обратных связей и снижение чувствительности системы управления в целом.

Критический анализ систем управления с усреднением значений температур по нескольким каналам показал, что, несмотря на простоту, данный метод не всегда может адекватно оценивать распределенное температурное поле в помещении. Поэтому, целесообразно предусмотреть селекцию сигналов обратных связей, которая могла бы решить следующий ряд задач:

1) обеспечение непрерывного мониторинга температурного поля в помещении;

2) осуществление управления с учетом не только усреднённого значения температуры в помещении, но и с учетом значений отклонений температур от среднего;

3) реализация гибких правил усреднения в зависимости от параметров объекта;

4) улучшение динамических характеристик системы кондиционирования воздуха;

5) практическая реализация и простота.

УДК 681.51

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук; М.Ю. Подобед, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ В ПОМЕЩЕНИЯХ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ**

Самой простой, с точки зрения материальных вложений и трудоемкости реализации, и распространённой каскадной САУ СКВ на данный момент является схема, при которой датчик приточного воздуха располагается в воздуховоде после калорифера — замыкая обратной связью внутренний контур управления, а датчик температуры воздуха в помещении — в вытяжном воздуховоде. При такой схеме реализации, температура вытяжного воздуха принимается в качестве обобщающей характеристики тепловой нагрузки, формируемой различными источниками со сложной пространственно-временной распределенностью в плане и по высоте помещения. Такая схема САУ может применяться в помещениях с более-менее равномерно распределенной технологической нагрузкой в объеме помещения, например на швейных производствах, теплица, парниках и т.д.

Наиболее корректные системы каскадного управления СКВ представляют схемы с расположением нескольких датчиков температуры в помещении в контрольных точках. В таком случае контроллер высчитывает среднее значение от нескольких датчиков температуры в помещении, и работает по среднему значению. Такие системы обладают рядом преимуществ, в сравнении с каскадными системами с контролем температуры вытяжного воздуха. Наиболее корректные системы каскадного управления СКВ представляют схемы с расположением нескольких датчиков температуры в помещении в контрольных точках. В таком случае контроллер высчитывает среднее значение от нескольких датчиков температуры в помещении, и работает по среднему значению. Такие системы обладают рядом преимуществ, в сравнении с каскадными системами с контролем температуры вытяжного воздуха: способны контролировать локальные изменения температур на конкретных рабочих местах в помещении; уменьшено влияние на показания температуры в помещении различных видов нагрузки; частичное отсутствие влияния запаздывания при больших размерах помещения.



УДК 621.373

М. А. Анкуда, ассист.; И. О. Оробей, доц., канд. техн. наук,  
(БГТУ, г. Минск)

### **ЯМР-МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ ПРЕЦЕССИИ**

При решении различных прикладных задач часто возникает необходимость прецизионного измерения слабых магнитных полей. Для подобных целей обычно используют магнитометры, для которых предъявляют очень высокие требования по точности. Особенно такая задача актуальна при измерении полей, близких по значению либо ниже поля Земли. При этом индукция поля Земли не превышает  $56 \cdot 10^{-6}$  Тл. Одним из возможных решений такой задачи является использование нутационного ядерно-магнитного магнитометра.

Ядерно-магнитный преобразователь действует следующим образом: ядра атомов вещества с магнитным моментом при помещении во внешнее магнитное поле начинают прецессировать вокруг вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля [1]. Частота прецессии ядер атомов вещества связана с индукцией внешнего магнитного поля следующим соотношением:

$$\omega = \gamma B_0, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение ядер,  $B_0$  – индукция внешнего магнитного поля.

Структурная схема ЯМР-измерителя магнитных полей с временным разделением процесса отметки и регистрации представлена на рис. 1.

Отметка образца производится инверсией вектора ядерной намагниченности радиочастотным полем катушки нутации. Отметка инверсией осуществляется при выполнении условия:

$$\pi = \gamma B_1 \tau_u, \quad (2)$$

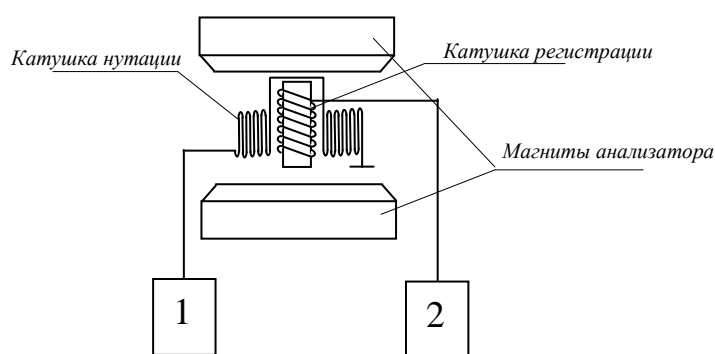
где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер,  $B_1$  – индукция наводимого магнитного поля,  $\tau_u$  – длительность импульса на выходе генератора импульсов.

Анализ вектора намагниченности образца производится при помощи катушки анализатора, соединенной со спиновым детектором. В объеме катушки анализатора осуществляется и процесс постановки метки, и анализ ядерной намагниченности [2].

Для регистрации сигнала ЯМР используется автодинный спиновый детектор. Простота и надежность, а также возможность перестройки частоты при высокой чувствительности обуславливает широ-

кое использование автодинов в спектрометрах, магнитометрах, расходомерах [3].

Автодин настроен на регистрацию амплитудной модуляции собственных генерируемых высокочастотных колебаний в катушке регистрации. В этом случае амплитуда регистрируемого сигнала пропорциональна продольной компоненте намагниченности образца.



**Рисунок 1 – Структурная схема ЯМР-магнитометра:**  
1 – радиочастотный генератор; 2 – устройство регистрации сигнала ЯМР

Если добиться условий, когда значение частоты  $\omega$  от генератора радиочастотного сигнала, который подключен к катушке нутации, совпадает с частотой прецессии магнитного момента, а амплитуда подаваемого синусоидального колебания от генератора колебаний на катушку нутации выбрана так, чтобы выполнялось условие  $\pi$ -импульса, то в таком случае амплитуда регистрируемого инвертируемого сигнала ЯМР будет максимальной. Тогда измеряемое магнитное поле точно вычисляется по частоте прецессии.

Для ядер атомов некоторых веществ гиромагнитное отношение определено с высокой точностью, а измерение частоты выполняют с погрешностью, которая не превышает  $10^{-4}\%$ . Таким образом, рассматриваемый ЯМР-измеритель может обеспечить определение магнитной индукции с высокой точностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Леше А. Ядерная индукция /Леше А. Пер. с нем. – Москва.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 684 с.
2. Анкуда, М. А. Адаптивный меточный однокатушечный ЯМР-расходомер / М. А. Анкуда // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2011. – Вып. XIX. – С. 117-121.
3. Анкуда, М. А. Модель автодина с параметрическим возбуждением / М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. - Минск : БГТУ, 2016. - № 6 (188) 2016 год. - С. 127-131.

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
И.Г. Сухорукова, ст. преп.; Н. М. Олиферович, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## О НАСТРОЙКЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

Качественная настройка промышленных регуляторов способствует повышению стабильности технологических параметров и уменьшает энергозатраты на единицу продукции. Это обусловлено уменьшением переходных процессов и критических отклонений.

Практика обучения специалистов теории управления, а также большинство учебной литературы используют наблюдение за переходным процессом вследствие изменения сигнала задания для проверки качества регулирования. В тоже время большинство систем стабилизации технологических параметров предназначены для подавления возмущений в процессе функционирования.

Для настройки пропорционально-интегрального (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов использовался модифицированный интегральный критерий [1].

$$J = \int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min.$$

Произведено сравнение настроек, полученных при рассогласовании состояния системы по каналу возмущения  $f$  и отклонения  $SP$ . Анализ приводилось путем имитационного моделирования в пакете MatLab. Система представляла собой многоемкостный объект с запаздыванием  $\tau$  (рис.1). Во время исследований постоянные времени оставались неизменными, время запаздывания менялась от нулевого значения до доминирования.

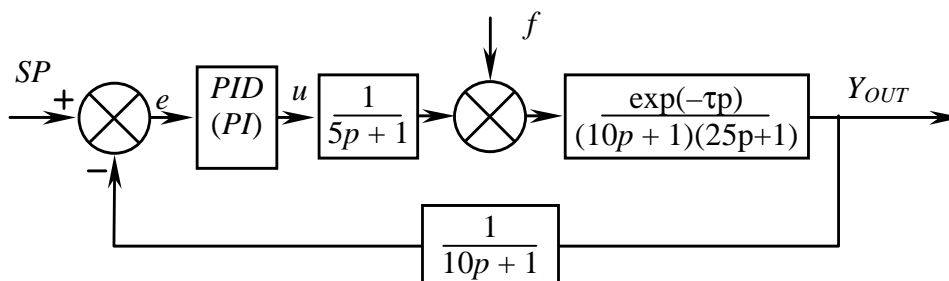
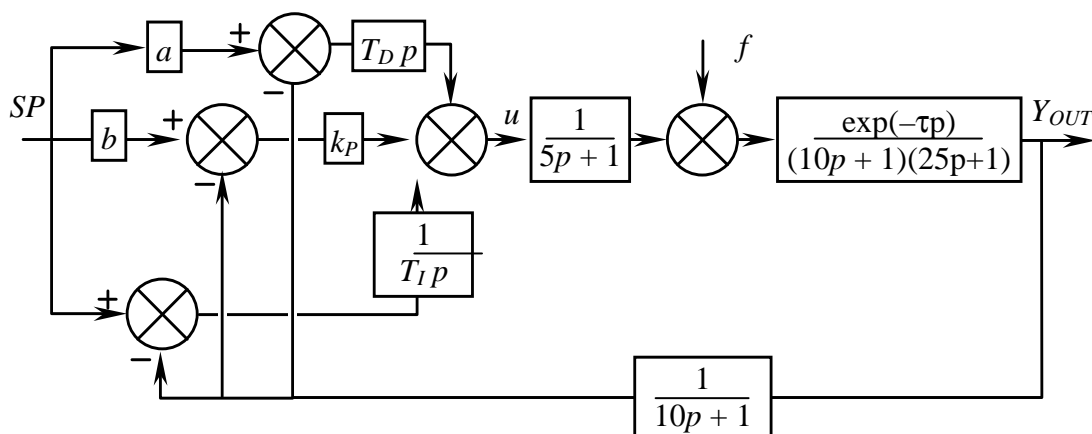


Рисунок 1 - Система имитационного моделирования

В результате оптимизации получились существенные расхождения в параметрах коэффициентов настроек регуляторов. Введение дополнительных настроек по каналу задания, при оптимальных на-

стройках по каналу возмущения, позволяет улучшить переходной процесс и практически достигнуть уровня качества аналогичного оптимизации по каналу задания (рис. 2.) [2].



**Рисунок 2 - Система обеспечения качественного регулирования по возмущению и отклонению**

Результаты исследований позволяют предложить следующую методику настройки регулятора: произвести минимизацию интегрального критерия  $J$  путем поиска параметров  $k_P$ ,  $T_I$  и  $T_D$  (или  $k_P$  и  $T_I$  для ПИ), и далее минимизацию интегрального критерия по каналу задания находя коэффициенты  $a$  и  $b$ .

Разработанная методика работоспособна для нелинейного регулятора [3] с использованием логарифмического закона преобразования ошибок  $e$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гринюк, Д. А. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости / Д. А. Гринюк, И. О. Оробей, И. Г. Сухорукова // Труды БГТУ. №6, Физ.-мат. науки и информатике. – 2012. – С. 118-121.
2. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 610 с.
3. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 27 April 2017, pp.1–4.

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук,  
И.Г. Сухорукова, ст. преп.,  
Н. М. Олиферович, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Для стабилизации технологических параметров чаще всего используется пропорционально-дифференциально-интегральный (ПИД) закон регулирования. Чаще всего этот алгоритм реализуется в различных вариациях с использованием программируемых логических контролеров (ПЛК). Иногда для этих целей используются отдельные модули или микропроцессорные регуляторы. Кроме того, многие современные частотные инверторы имеют дополнительную опцию – встроенный ПИД-алгоритм. ПЛК обладает более широкими возможностями по стабилизации технологических параметров.

Большинство методов настройки в теории управления предполагают проведение длительных исследований по поиску настроек ПИД-регулятора на основе анализа его амплитудно-фазочастотных характеристик, расположения корней или численной оптимизации. Все это практически исключает автономность перестройки регулятора при обнаружении системой идентификации изменений параметров динамики контура регулирования. В тоже время существует несколько алгоритмов синтеза регуляторов на основании цифрового представления передаточной характеристики [1].

В MatLab был проведен синтез цифровых регуляторов и проверка робастности путем вариации коэффициента усиления объекта. ПИД-регулятор проявил большую устойчивость, чем регуляторы по методикам [2]. В тоже время увеличение длительности тактов работы цифрового регулятора позволяет повысить робастность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Изерман, Р. Цифровые системы управления: пер. с англ. / Р. Изерман. - М. : Мир, 1984. – 541 с.
2. Гринюк Д.А. Цифровые алгоритмы для управления технологическими процессами. / Д.А. Гринюк, И.О. Оробей, И.Г. Сухорукова, Н.М. Олиферович // МНТК «Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013)», Минск, – Минск: БГУИР, 2013 - С.38-39.

УДК 681.532.8:

И. О. Оробей, доц., канд. техн. наук; Е. А. Лысов, асп.;  
М. А. Анкуда, ассист.; Н. М. Олиферович, ассист.;  
Д. В. Кузьмицкий, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **АДАПТИВНЫЙ КОНТУР С ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ПО ИЗМЕНЯЕМОМУ КРИТЕРИЮ**

В настоящее время в контурах регулирования измерительных систем часто предполагается адаптация условий измерения на основе предыдущего результата либо получение результата при нескольких отличающихся условиях работы чувствительного элемента [1]. Для таких систем большое значение имеет время и точность установления требуемого состояния при недопустимости перерегулирования или при заданной максимальной величине перерегулирования.

Противоречивость требований, предъявляемых к таким контурам регулирования, заключается в том, что переходной процесс по заданию необходим по принципу функционирования системы, а контур регулирования должен обеспечить как быстрое время установки, так и малое (в идеале нулевое) рассогласование, что налагает противоречивые требования к настройкам регулятора. Эти требования удается удовлетворить путем изменения уставок в зависимости от величины расстройки (ошибки) сигнала на выходе регулируемого объекта и сигнала задания. При большой величине расстройки параметры ПИД или ПИ регулятора выбираются по критерию, обеспечивающему максимальную скорость установки с перерегулированием и колебательностью, значительно превышающими допустимые для данной системы (большой относительный вклад пропорциональной и дифференциальной составляющих и меньший вклад интегральной). При уменьшении сигнала ошибки вклад пропорциональной и дифференциальной составляющих снижают, увеличивая вклад интегральной. Ход изменения критерия определяется динамическими свойствами регулируемого объекта.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Orobei I.O A gas-mixtur consentration meter / Orobei I.O., Shishkin N.Y., Saroka V.V. Instruments and Experimental Techniques. 2004. T.47. № 3. p. 415-416.

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук;  
Н. М. Оробей, доц., канд. техн. наук;  
Д. Ю. Павлюкевич, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ**

Конвейерная техника широко используется в промышленности стройматериалов, добывающей, химической и других отраслях. Надежная и бесперебойная работа конвейеров зачастую обеспечивает производительность всего предприятия.

Лента, роlikоопоры, барабаны и другие компоненты конвейера работают в условиях постоянного механического взаимодействия. Это приводит к возникновению механических колебаний всех элементов конвейера. Но, в тоже время, из-за механических особенностей каждой компоненты спектральные составляющие для каждой из них обладают своими особенностями. Создание математических портретов-шаблонов может позволить осуществлять диагностику как в комплексе, так и по отдельным компонентам. Фиксирование и анализ спектральных составляющих работы можно делать в комплексе, например установив системы контроля тока потребления двигателя, колебания конвейерной ленты, нагрузки на роликковые опоры, или с использованием отдельных информационных каналов [1].

С целью анализа потенциальных возможностей данного подхода, было разработано измерительное устройство контроля колебания ленты. В качестве чувствительного элемента выступал бесконтактный измерительный преобразователь линейных перемещений компании Omron, предоставленный «Балтаком Электроникс». Фиксация измерительной информации на предприятии осуществлялась с помощью цифрового осциллографа с управлением от переносного компьютера. В результате измерений были получены спектры для конвейеров с различной грузоподъемностью. Анализ проводился как с помощью быстрого, так и обычного преобразования Фурье. Для конвейеров с одинаковой производительностью найдены общие и индивидуальные характеристики.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. – М.: Машиностроение, 1978. – 392 с.

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук;  
Н. М. Оробей, доц., канд. техн. наук;  
Н.Н. Бирюкова, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ, СОПРОВОЖДЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ ИХ ТРАЕКТОРИЙ**

Одной из задач, которая интересует потребителей систем обнаружения и сопровождения объектов, является распознавание движущихся или возникающих на изображении объектов. Другому варианту соответствует задача обнаружения неподвижного объекта, присутствующего на изображении с момента начала наблюдения. Как правило, наряду с фактом обнаружения объекта, ставится задача оценки его параметров [1].

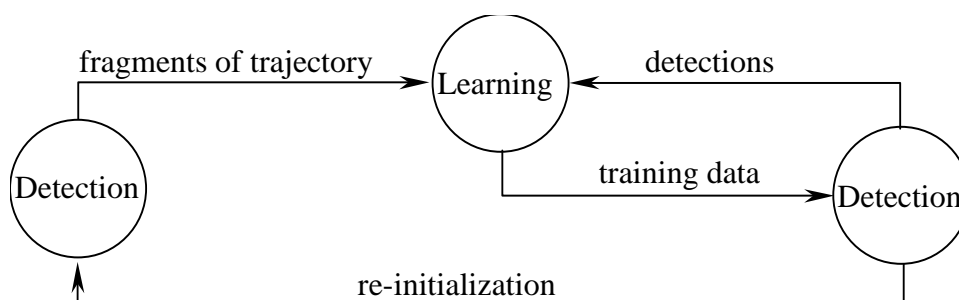
Общего универсального подхода к построению систем компьютерного зрения не существует. Это во многом обусловлено широким кругом задач, где сейчас используется компьютерное зрение, аппаратной базой и финансированием. В открытых источниках можно встретить решения как на достаточно слабых микроконтроллерах типа Arduino и Raspberry Pi, так и на больших многоядерных системах и кластерах.

С развитием вычислительных мощностей микропроцессорных средств построение систем компьютерного зрения стало выходить на большой круг задач прикладного направления. Компании, которые имеют длительную историю развития, предлагают собственные решения, основанные, в большинстве своем, на выше указанных методиках. В тоже время, в данном направлении получили распространение алгоритмы с использованием открытых разработок и создания готовых библиотек. Самой популярной кумулятивной библиотекой здесь является OpenCV [2], которая легко интегрируется в Microsoft Visio Studio, Matlab, LabVIEW, Phyton и Qt.

В основе парадигмы Tracking-Learning-Detection (TLD) [3] лежат: сопровождение, обучение и обнаружение. Они являются тесно взаимосвязанными между собой за счет использования, с одной стороны – фрагментов траекторий и результатов обнаружения, для обучения; а результатов обучения, в свою очередь, - в процессе обнаружения (рис. 1).

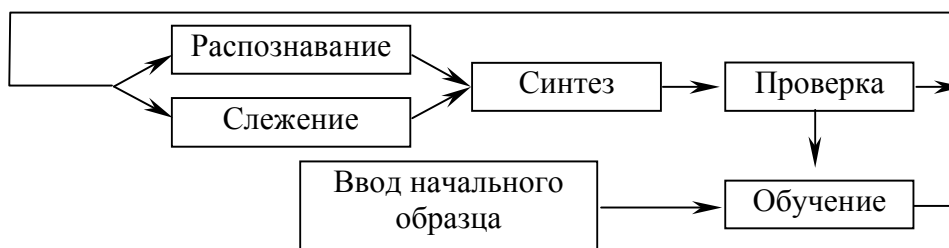


Процессом обучения управляет пара «экспертов», которые производят оценку ошибок детектора.



**Рисунок 1 - Парадигмы TLD**

Другая парадигма – «слежение-по-распознаванию» оценивает объект по измерениям, полученным исключительно в текущем изображении. Этот метод исключает возникновение накопления ошибок (рис. 2.)



**Рисунок 2 - Общая схема работы TLD-алгоритма**

Среди прочих парадигм, адаптивные методы «слежения-по-распознаванию» были разработаны, чтобы обновлять детектор объекта интерактивно. Они предполагают «самообучение» для получения новых образцов детектора. В самообучении детектор постоянно «переобучивается», дополняя либо удаляя точки, принадлежащие объекту. Для повышения точности сопровождения под конкретные задачи используют и совместную работу различных подходов, например TLD, CMT и Struck

## ЛИТЕРАТУРА

1. Старовойтов В.В. Цифровые изображения: от получения до обработки / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с.
2. G. Bradski and A. Kaehler. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 1st edition, Oct. 2008.
3. B. D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 674–679, 1981.

УДК 676.22.017

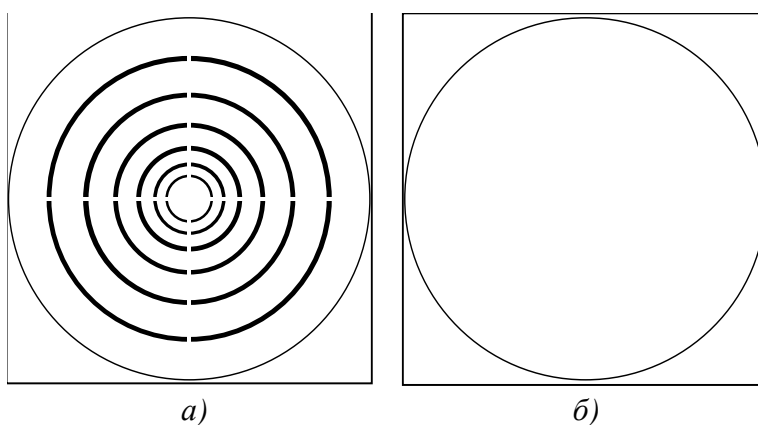
Н.М. Олиферович, ассист.; Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВПИТЫВАНИЯ

Ввиду наличия процессов гидратации в процессе пропитки фильтровальной бумаги первичного преобразователя впитывания, и, как следствие, снижение точности измерения величины емкости, встает задача оптимизировать конструкцию емкостного датчика [1].

Целью экспериментальных исследований являлось изучение особенностей процесса пропитки на базе первичного преобразователя с геометрически неоднородным конденсатором, который способен по резким изменениям скорости идентифицировать координату. Основной целью являлась оптимизация геометрической конструкции первичного измерительного преобразователя.

Для исследований были выбрана структура неоднородного конденсатора, представленная на рис. 1. В данном случае радиусы колец имеют квадратичную зависимость, что обусловлено решением уравнения динамики пропитки, которое имеют корневую зависимость.



*a)* – нижняя пластина, *б)* – верхняя пластина

**Рисунок 1 - Структура неоднородного конденсатора**

Пластины неоднородного конденсатора изготавливались из текстолита размерами 100x100мм в которых, в соответствии с рис. 1, были выполнены каналы, соответствующие областям отсутствия металлизации (обозначены черными линиями). Для исследований были изготовлены варианты с шириной каналов 0,5...2 мм. С целью предотвращения затекания воды в процессе распространения фронта смачивания каналы были заполнены водно-дисперсионной шпатлевкой. Гидроизоляция пластин конденсатора обеспечивалась путем нанесения лакового покрытия.

На базе полученной конструкции неоднородного конденсатора был проведен ряд опытов по пропитке фильтровальной бумаги. В качестве анализируемой жидкости была использована техническая вода. Для преобразования измеряемой емкости во временные параметры была использована схема, представленная на рис. 2.

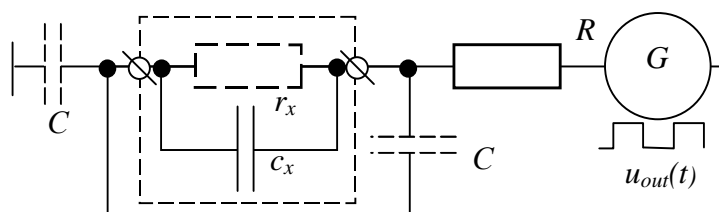


Рисунок 2 - Схема преобразования  $c_x$  во временные параметры

Генератор звуковой частоты обеспечивал формирование тестовых сигналов. Двухканальный осциллограф с возможностью передачи данных по USB на персональный компьютер позволял фиксировать полученные результаты, которые подвергались дальнейшей обработке с помощью математического пакета MatLab.

Поскольку параметры схемы замещения подвержены существенным изменениям [2], то амплитуда колебаний от генератора и параметры последовательного резистора  $R$  ступенчато менялись в процессе испытаний с помощью коммутаторов.

Дальнейшая математическая обработка представляла собой квадратное разложение с использованием опорной частоты и получение параметров схем замещения путем адаптивного сглаживания [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Oliferovich N. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates / N. Oliferovich, D. Hryniuk, I. Orobei // 2015 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2015), Vilnius, Lithuania, 21 April 2015, pp. 1–4.

2. Олиферович Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Анализ динамических характеристик и динамических погрешностей преобразователя измерения параметров впитывания // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – Минск, БГТУ, С. 96-99.

3. D. Hryniuk. Adaptive smoothing and filtering in transducers/ D Hryniuk, I Suhorukova, N Oliferovich// 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 19 April 2016, pp. 1–4.

М. А. Кашкан, магистрант;  
Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ**

Предназначением теории управления является сознание на основе системного анализа статистических и динамических связей объекта управления алгоритмов управления для обеспечения целевого протекания процесса. Задача синтеза робастного регулятора для класса линейных систем с параметрической неопределенностью является распространенной проблемой проектирования типовых систем управления. Развитие приемов робастного управления имеет важное направление развития современной теории управления.

Теплообменные аппараты имеют различные аспекты функционирования в технологических процессах. Первичной задачей синтеза робастной системы управления является поиск математического описания каналов управления. Одной очевидной трудностью является то, что температура практически всегда является распределенным параметром. Это накладывает на синтез регулятора как проблему измерения (показания измерительного преобразователя имеют статическую и динамическую погрешность), так и математического описания (наиболее корректным описанием является использование уравнений в частных производных).

Дальнейшая задача обуславливается теоретическими или прикладными аспектами. Теоретические аспекты имеют достаточно четкую формировку, что вылилось в ряд фундаментальных книг и различных программных продуктов, как например MDSLS.

В тоже время прикладной аспект робастности сформировался несколько в иной плоскости. Он предусматривает статистический и динамический анализ функционирования существующего объекта с целью определения вариации динамических и статических параметров математического описания объекта, а также определение вариации внешних возмущений, которые воздействуют по различным каналам на объект управления. Поскольку очень часто, те же теплообменники, являются с переменными параметрами и/или составными частями большой технологической схемы, то это привело на практике к тому, что закладывается излишняя устойчивость.

С. Е. Жарский, доц., канд. техн. наук;  
Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
М. А. Анкуда, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **САМОПОДСТРАИВАЮЩИЙСЯ РЕГУЛЯТОР РАСХОДА ПРОЛИВНОЙ УСТАНОВКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА**

С точки зрения обеспечения стабильности расхода и метрологических параметров, настройка регуляторов расхода необходимый процесс при наладке и проектировании проливных установок. Это обусловлено необходимостью уменьшения влияния нестабильности гидравлических параметров насосов, клапанов и критических отклонений.

Обычной практикой является следующий алгоритм установки заданного расхода: а) вручную устанавливается необходимый расход при неизвестном гидравлическом сопротивлении (количество приборов и их условные диаметры заранее неизвестны), б) расход стабилизируется в течении какого-то времени, в) за фиксированное время набирается необходимая масса, при незамкнутом контуре регулирования расхода, г) даётся метрологическая оценка проведенному измерению (в том числе и по стабильности поддержания расхода).

Подобный подход приводит к необходимости часто повторять процесс измерения не из-за метрологического несоответствия поверяемых приборов, а из-за проблем со стабильностью расхода самой установки. Что при существенной длительности процесса измерения, особенно на малых расходах, отрицательно сказывается на производительности установки и, следовательно, стоимости самой поверки. Большинство (абсолютное) современных поверительных установок в РБ функционирует именно по этому принципу.

Простейший способ регулирования в виде реализации ПИ или И закона регулирования с единым диапазоном также показывает неудовлетворительные результаты. Использование нелинейных методов настройки [1] также не приносят удовлетворительного результата. Причины неудачи простейшего подхода, несмотря на его привлекательность, кроются в следующем: существенная нелинейность объекта, непредсказуемость гидравлического сопротивления измерительной линейки. При таком разбросе свойств объекта настройка системы управления приводит к необходимости робастной настройки, что в свою очередь отрицательно сказывается на длительности переходного процесса (установки заданного расхода).

Применение адаптивной системы регулирования [2, 3] в данной ситуации также не представляется возможным из-за длительности процесса настройки системы и запуска системы самонастройки при переходе между установленными расходами. Ситуацию осложняет также и то, что различные приборы имеют различные точки поверки.

Перечисленные факторы не позволяют полностью исключить человека из процесса поверки, что также вносит возможность влияния человеческого фактора, и замедляет процесс поверки.

Решение данной проблемы находится в построении системы регулирования с заданными диапазонами расходов, с самостоятельными настройками для каждого диапазона. Количество диапазонов в данном случае определяется нелинейностью статической характеристики установки, типом используемого насосного оборудования и требуемыми точностями настройки точек проливки. При этом повышается быстродействие системы регулирования, и её точность. Применение системы регулирования, обеспечивающей точную установку расхода и его стабильность, приводит к реализации полной автоматизации процесса поверки. Поверка сводится к заданию точек поверки (перечня расходов) и количеству повторов в каждой точке. При этом появляется возможность построить автоматизацию и бумажных процессов, сопровождающих процесс поверки.

Данный принцип управления расходами реализован на проливной установке БЕЛГИМ п. Привольный. Установка функционирует в течение 3 лет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 27 April 2017, pp.1–4.
2. Жарский, С. Е. Модель и система регулирования реагентной очистки сточных вод / С. Е. Жарский, И. О. Оробей, Д. А. Гринюк. – Труды БГТУ. №12, Физ.-мат. науки и информатике. – 2004. – С. 122.
3. Shumski A., Karpovich D. Investigation of the Robust Stability of System with Delay. // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 27 April 2017, pp.1–4.

УДК 64.011.5

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук;  
В.Б. Михайлов, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск);  
С.Д. Латушкина, зав. лаб., канд. техн. наук (ФТИ НАН Беларуси, г. Минск);  
Dainius Udris, PhD (ВГТУ им. Гедыминеса, г. Вильнюс)

## **ОБРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРОВ**

В настоящее время значительно возрос интерес к измерениям температуры с помощью тепловизоров и ИК-термометров. Современные тепловизоры используются в тех случаях, когда необходим тщательный контроль за тепловым состоянием объектов и необходимо бесконтактное измерение температуры.

Современные тепловизоры в своей работе используют матричные фотоприемники (матрицы ПЗС-датчиков), дающие сразу полное изображение температурного поля объекта. Тепловизионная техника служит для измерения температуры объектов бесконтактным способом, однако, при этом следует помнить, что тепловизор фиксирует не само температурное поле, а лишь тепловой поток в ИК-области, излучаемый поверхностью тела. Определение поля температур и построение термограмм производится программным обеспечением, «зашитым» в память тепловизора. Само же программное обеспечение прибора зачастую не учитывает многие физические эффекты, возникающие при излучении, поглощении и отражении теплового излучения, что неминуемо сказывается на результатах измерения температуры.

Следует учитывать, что существует большое количество факторов, влияющих на точность измерения температурных полей с помощью тепловизионной техники. К таким факторам в первую очередь следует отнести: структуру поверхности; наличие покрытий на поверхности; угол наблюдения; форму поверхности. Также необходимо учитывать параметры окружающей среды: отраженной температуры и конвективного потока воздуха.

## НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ БОКОВОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПРИ ПОЛЕТЕ ПО МАРШРУТУ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Для выполнения качественного регулирования необходимы знания о динамическом поведении объекта управления.

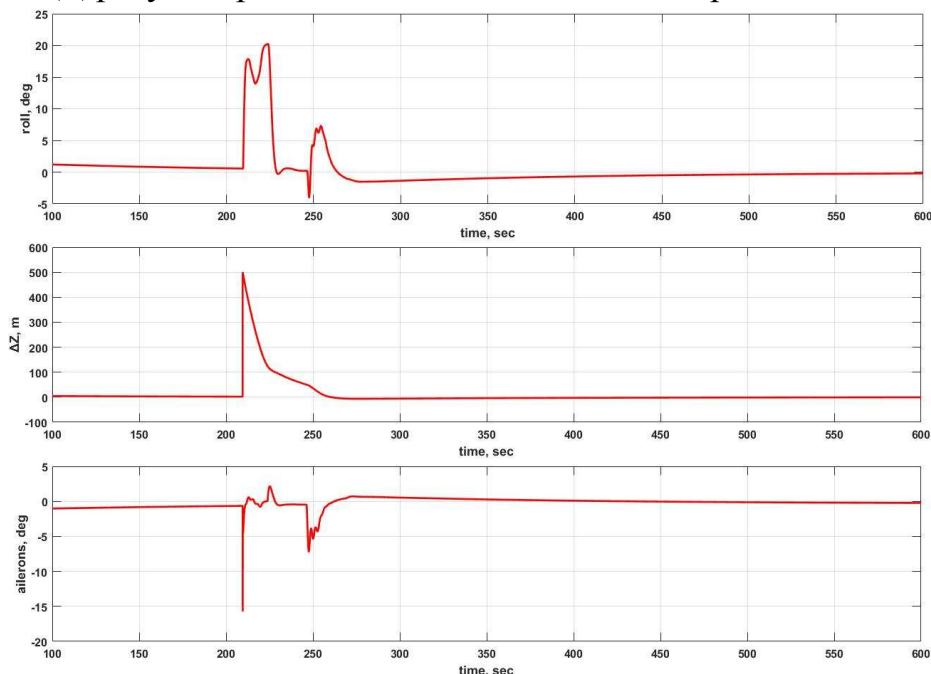
Была рассмотрена настройка коэффициентов регулятора для стабилизации отклонения при полете по маршруту

В качестве закона управления для стабилизации бокового отклонения при полете по маршруту использована следующая зависимость [3]:

$$\delta_{\sigma} = K_{\omega_x} \omega_x + K_{\gamma} \gamma - K_{\Delta\psi} \Delta\psi + K_Z Z + K_Z \int Z dt. \quad (1)$$

Исходя из закона управления (1), можно сделать вывод, что необходимо использование комбинацию трех регуляторов:

- ПИ-регулятор стабилизации  $\Delta Z$ ;
- П-регулятор стабилизации  $\Delta\psi$  (отклонение от курса линии заданного пути (ЛЗП));
- ПД-регулятор защиты от максимального крена.



**Рисунок 1 - Стабилизация бокового отклонения  
при полете по маршруту**



В. В. Лихавицкий, ст. преп.,  
В. И. Романовский, ст. преп., канд. техн. наук,  
(БГТУ, г. Минск)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ОЗОНА ПО ВЫСОТЕ СТОЛБА ЖИДКОСТИ**

Изучение закономерностей растворения озона в воде по высоте столба жидкости от параметров обработки являются необходимыми для разработки новых технологий дезинфекции сооружений водоснабжения с использованием озона. Представленные в литературе сведения по растворимости озона в воде позволяют рассчитать только равновесную концентрацию без учета других факторов.

Проведенные ранее авторами исследования позволили установить влияние каждого из изменяемого параметра на остаточную концентрацию озона в воде.

Для оценки величины линейной связи между переменными параметрами и выбора вида уравнения математической модели применялся выборочный коэффициент корреляции. С учетом принятой формы уравнений регрессии с использованием статистических данных с помощью метода наименьших квадратов было рассчитано уравнение регрессии. Оценка адекватности полученного уравнения производилась по соотношению расчетного и табличного значения критерия Фишера при уровне значимости 5%.

Графически проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и кривой, полученной расчетным путем по уравнению регрессии. Полученные результаты построения регрессионного уравнения по экспериментальным результатам свидетельствуют о том, полученная модель является адекватной, а характер изменения полученных зависимостей подтверждают выполненные исследования

Полученная математическая модель позволяет описать зависимость концентрации озона в воде от заданных параметров: диаметра моделируемой скважины (0,1–0,3 м), высоты отбора пробы от точки ввода газовой смеси (0–4 м), концентрации озона в газовой смеси (2,7–55 г/м<sup>3</sup>), времени обработки (10–60 мин), расхода газовой смеси (3,3–700 дм<sup>3</sup>/мин).

УДК 621.3.085

В.Б. Михайлов, доц., канд. физ-мат. наук.;  
Д.Е. Сидорчик, асп.  
(БГТУ, г. Минск)

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ИНДИКАТОР ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, АДАптиРОВАННЫЙ С МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ АСУ ТП**

В приборах для измерения пороговых значений концентраций опасных газовых выбросов на химических производствах могут использоваться пленочные оксидно-полупроводниковые датчики, полученные с использованием различных технологий [1].

Проблемой использования таких датчиков является то, что при росте измеряемой концентрации газов (таких как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$  и др.) резко меняется и проводимость поверхностного слоя  $\text{SnO}_2$  или  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Sn}$ . В связи с этим, вынужденной мерой было использование пропорционального дозатора исследуемого газа, это значительно удорожало прибор и требовало определенной квалификации персонала. Вторым способом устранения этого недостатка было уменьшение температуры рабочего тела датчика, что снижало скорость роста сигнала датчика, но приводило к росту времени восстановления сопротивления (проводимости) датчика [2].

Устранены эти явления созданием наноструктурированных пленочных датчиков полупроводникового типа, как тонкопленочных, так и толстопленочных с маломощным нагревателем. При напылении тонкопленочных датчиков на установке магнетронного распыления «Магна-100» осуществлялся «подпыл» наноразмерных островковых несплошных пленок  $\text{Au}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ , т.е. каталитических добавок, а при создании толстопленочных элементов в состав были введены суспензии С-фуллеренов и С-нанотрубок в контролируемой концентрации. В обоих случаях скорости обратимых реакций при сорбции – десорбции возросли в 4÷5 раз. Это позволило уменьшить температуру датчика до 200÷300 °С с достаточно быстрым восстановлением стабильного исходного состояния.

Возможность быстро менять температуру датчика появилась при новой конфигурации нагревателя, сформированного как на ситалловых, так и на кремниевых подложках. Питание нагревателя осуществлялось от частотномодулированного источника постоянного тока.

Таким образом, разработанные новые чувствительные элементы для анализа газовых сред имеют достаточную чувствительность

( $1 \div 5$  ppm) и сравнительно малые времена нарастания сигнала ( $2 \div 3$  с) и восстановления (до 10 с).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.Б. Толсто пленочные интегральные газочувствительные элементы на основе  $\text{SnO}_2$  // Труды БГТУ, Сер. Химии и технол. Неорганических веществ. 2002. Вып. X. с. 244-249.
2. Сидорчик Д. Е., Карпович Д. С.. Фильтрация данных гироскопа с помощью фильтра Калмана на микроконтроллере АТМТGA328Р // материалы МНТК, 22-24 октября 2015 г. БГТУ. С. 41-45.

УДК 621.398

Д.Е. Сидорчик, асп.; В.А. Стоцкий, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТИ

Нейронные сети представляют большой интерес для ученых на сегодняшний день. Системы технического зрения несомненно отстают в области распознавания образов от зрительного аппарата человека вкупе с его нейронной системой. Несмотря на явные преимущества искусственных нейронных сетей, они обладают существенным рядом проблем. Например, не всегда понятно, как подойти к вопросу обучения такой сети. [1].

Нейронная сеть Хопфилда (рисунок 1) состоит из единственного слоя нейронов, число которых определяет число входов и выходов сети. При этом сеть является полностью связной - выход каждого нейрона соединен с входами остальных нейронов по принципу «со всех на все». По сути, сеть Хопфилда показывает, каким образом может быть организована память в сети из элементов, которые не являются надежными.

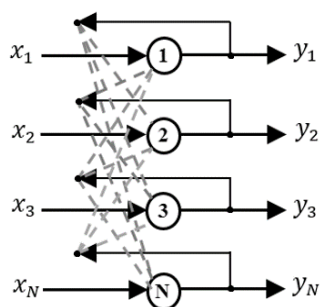


Рисунок 1 – Пример нейросети Хопфилда

Каждый нейрон может находиться в одном из двух состояний:

$$y_i(t) = \begin{cases} +1 \\ -1 \end{cases},$$

где +1 соответствует «возбуждению» нейрона, а -1 «торможению».

Нелинейный, пороговый характер функционирования нейрона отражает дискретность его состояний. В нейрофизиологии такой принцип известен, как «Все или ничего». Динамика состояния во времени  $i$ -го нейрона в сети из  $N$  нейронов описывается дискретной динамической системой:

$$y_i(t+1) = \text{sign} \left[ \sum_{j=1}^N H_{i,j} y_j(t) \right],$$

где  $H_{i,j}$  – матрица весовых коэффициентов, описывающих взаимодействие дендритов  $i$ -го нейрона с аксонами  $j$ -го нейрона.

Алгоритм обучения сети Хопфилда существенно отличается от алгоритма обратного распространения ошибки. Вместо последовательного приближения к нужному состоянию с промежуточной коррекцией весов, все коэффициенты рассчитываются по одной формуле и за один шаг, после этого сеть будет готова к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нейронная сеть Хопфилда и ее применение // [Электронный ресурс] URL: <http://iasa.org.ua/lections/tpr/neuro/hopfield.htm>

УДК 64.011.5

А.В. Широков, инж.(ОАО "ИНТЕГРАЛ", г. Минск);  
Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

#### **КОНСТРУКТИВНАЯ БАЗА И СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Современные DC/DC преобразователи способны работать в широком диапазоне входных напряжений. Они отличаются высокой надёжностью, производительностью и при этом умещаются в очень компактных корпусах, что позволяет использовать их на платах с высокой плотностью монтажа. Во многом этого удается достичь за счёт использования качественных электронных компонентов, к которым предъявляются высокие технические требования. Уменьшение размеров стало возможным с появлением технологии поверхностного монтажа (SMD компоненты). Также уменьшились габариты за счёт замены моточных компонентов на планарные (например, трансформаторы) и примене-

ние технологии chip-on-board.

Обычно импульсные преобразователи показывают наибольшую эффективность при нагрузке, близкой к максимально допустимой. Чем больше разница между входным и выходным напряжением, тем меньше КПД. Также следует учитывать график изменения КПД при малых нагрузках и в случае изменений условий эксплуатации, чтобы правильно оценить количество тепла, которое придётся отводить от конструкции в процессе её работы.

Лучшие современные преобразователи имеют КПД 80—97,5%. При этом не стоит пренебрежительно относиться к повышению КПД даже всего лишь на 1%: если один преобразователь имеет КПД 91%, а другой — 90%, то этот процент разницы соответствует изменению мощности, рассеиваемой преобразователем, на 10%.

Выбирая решение для создания преобразователя, необходимо учитывать, в каких режимах охлаждения измерялась допустимая выходная мощность — при естественной или принудительной вентиляции. Изолированные преобразователи всегда имеют меньший КПД просто из-за того, что потери в трансформаторах больше потерь в дросселях.

Немаловажную роль играет возможность преобразователя сохранять стабильность характеристик в условиях отсутствия регламентных регулировок и настроек в течение длительного времени.

УДК 64.011.5

Н.А. Кунцевич, инж. (УП «Минская обойная фабрика», г. Минск)

Д.С. Карпович, зав. каф., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### **ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТИСНИЛЬНО-СКЛЕИВАЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ**

Основной задачей производства на УП «Минская обойная фабрика», является является производство обоев. Для этого на предприятии имеется две тиснильно-склеивающие линии «Nil's» (Турция) и одна «JSM» (Англия) для производства дуплексных обоев мощностью 2,6 млн. усл. кусков в год. Для управления свойствами продукции необходимо точно знать, как изменяются показатели в процессе работы. С этой целью в работе на основании комплексной оценки определены основные параметры, влияющие на качество готовой продукции и производительность технологической цепочки.

Основными параметрами влияющими на качество конечного продукта и производительность машины являются: давление пара по-

даваемого в сушильную камеру, для изучения влияния величины давления пара подаваемого в сушильную камеру был проведен эксперимент, в ходе которого было установлено, чтобы избежать недостаточной просушки и предотвратить сворачивание краёв обойного полотна по причине пересушки, величина давления подаваемого пара должна быть в пределах от 0.5 до 0.9 МПа. Также важным параметром для контроля является величина линейного давления между каландровым бумажным и металлическим валами, в зависимости от производимого артикула, в соответствии с технологическим регламентом величина давления может составлять до 2450 Н/см.

Изменяющимися параметрами для производства являются: натяжение бумажного полотна, вид композиции, наличие гидрофобизирующих добавок, концентрация и скорость истечения раствора для проклейки, температура, расход, а также уровень клеевого раствора. В результате был получен массив данных об изменении показателей комплексной тестовой шкалы, который обрабатывали в среде JMP с построением дерева решения для каждого из показателей. Установлено, что, например, для управления показателем оптической плотности оттиска и оптимизации его значения необходимо изменять вид композиции с добавлением гидрофобизирующей добавки и концентрацию раствора с оптимальным значением 6–8 %. Для изучения влияния наполнения на печатные свойства бумаги проведено испытание ее печатных свойств с изменением в композиции вида наполнителя (мел, мраморный микрокальцит), наличия модифицирующей обработки катионным крахмалом, конечной зольности бумаги. В результате обработки результатов эксперимента получено, что наиболее значимыми факторами являются наличие модифицирующей обработки и зольность. Вид наполнителя не вносит существенного вклада в изменение печатных свойств бумаги. Проведенные опытно-промышленные испытания показали, что наличие поверхностной проклейки способствует повышению сродства бумаги к краске, введение наполнителя выравнивает структуру поверхности бумаги, снижает величину растискивания на оттиске, повышает выделяющую и разрешающую способность поверхности бумаги.

УДК 681.518

П. П. Ивахов, магистрант; И. А. Хаустов, доц., д-р техн. наук,  
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж)

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ДЕЗОДАРАЦИИ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

На современных производствах для контроля и управления технологическими процессами применяются программируемые логические контроллеры различных марок и моделей. Одной из функций которых является сбора и регистрация данных о ходе технологического процесса, что дает возможность применения современных методов обработки и анализа данных на основе нейросетевых технологий.

Для процесса дезодорации наиболее важными параметрами контроля являются: расходы греющего пара, рафинированного масла, лимонной кислоты; температуры масла после стадии предварительного нагрева и греющего пара. Критериями качества продукции, которые возможно отследить в реальном времени, являются цветное число и доля примесей в готовом продукте. Для анализа использовалась выборка из 50 численных значений каждого из вышеописанных параметров.

В ходе решения задачи кластеризации были осуществлены попытки использовать топологии нейросетей [1, 2], такие как персептрон и сеть с прямой передачей сигнала. К сожалению, разделение продукции даже на 2 класса с помощью персептрона не дало желаемого результата из-за большого количества ошибок – 28 %. Сеть с прямой передачей сигнала справилась с поставленной задачей лучше, при условии увеличения количества нейронов отвечающих за обработку сигналов до 20, что значительно снижает скорость работы системы.

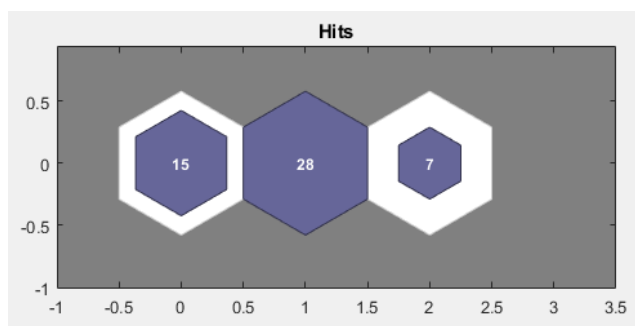


Рисунок 1 - Карта Кохонена

Наиболее применимой для поставленной задачи кластеризации является сеть Кохонена [3]. Это объясняется тем, что данная сеть об-

ладает свойствами адаптивной кластеризации, что снижает временные затраты по внедрению данной сети, к тому же результаты распределения выводятся в виде карт Кохонена, являющихся довольно удобными для восприятия человеком. Помимо этого применение сети Кохонена позволило осуществить разбиение выборки на три класса. К первому, наиболее многочисленному, относятся 28 значений - качественные изделия; ко 2-му, состоящему из 15 значений, относится продукция с пограничными значениями качества; к 3-му классу, количеством 7, относится брак.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горожанина, Е.И. Нейронные сети. Учебное пособие. [Текст] / Е.И. Горожанина. – Самара. ФГБОУ ВО ПГУТИ, 2017. – 84 с.
2. Neural Network Design. Martin. T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark H. Beale. Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma
3. Классификация объектов с помощью сетей Кохонена. Учебное пособие. [Текст]: / Воронеж. гос. ун-т инж. технол.; сост. Е.А.Балашова, А.Е. Емельянов. – Воронеж : ВГУИТ, 2016. – 32 с.

УДК 681.5.015:57.083.13

Н. В. Суханова, доц., канд. техн. наук; Ю. Е. Кожевников, инж.;  
К. В. Дугина, студ. (ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж)

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ И ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТБОРА БИОМАССЫ

Рассмотрим математическую модель процесса в виде [1, 2, 3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta \frac{dX}{dt} = \theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot K_4 \cdot X^{2(i)} - \theta \cdot \frac{F}{V^{(i)}} \cdot X^{(i)} + (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_1}{dt} = -\frac{\theta}{Y_{X/S_1}} \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot m \cdot X^{(i)} + \\ + \theta \cdot \frac{F_1}{V^{(i)}} \cdot (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_2}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{02} + \frac{(\alpha_{m2} - \alpha_{02}) \cdot S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_2}{V^{(i)}} \cdot (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_3}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m3} - \alpha_{03}) \cdot S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_3}{V} \cdot (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\ F = F_1 + F_2 + F_3; \\ \theta \frac{dT}{dt} = T^{(i)} + T_B^{(i)} + \theta \cdot \varphi^{(i)} \cdot a_0 \cdot (X^{(i)} - X^{(i-1)}) \cdot V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{в03}} \cdot \Delta I. \end{array} \right. \quad (1)$$



где  $\mu_m$  - максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $K_1, K_2, K_3, K_4, Y_{X/S1}, K_5, K_6$  - коэффициенты;  $\alpha_0$  и  $\alpha_m$  - минимальное и максимальное содержание элемента в биомассе для минеральных субстратов;  $X, S_1, S_2, S_3$  - концентрации биомассы, углеводов, азота и фосфора соответственно;  $V$  - объем жидкости;  $F$  - объемная скорость подачи питательных веществ;  $F_1, F_2, F_3$  - объемные скорости подачи мелассы, сульфата аммония и диаммонийфосфата;  $S_{01}, S_{02}, S_{03}$  - концентрации сахаров, азота и фосфора в подпитке;  $m$  - скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности;  $\theta$  - время роста микроорганизмов в аппарате;  $a_0$  - коэффициент удельного тепловыделения дрожжей;  $G_{\text{воз}}$  - массовый расход воздуха;  $\Delta I$  - приращение теплосодержания воздуха;  $G_{\text{в}}^{\text{ох}}$  - массовый расход воды на охлаждение;  $C_{\text{в}}$  - удельная теплоемкость воды;  $T$  - температура культуральной среды в аппарате;  $T_{\text{в}}$  - температура воды в рубашке аппарата.

Для определения оптимального значения концентрации микроорганизмов и величины оптимального отбора биомассы, необходимо по ходу процесса культивирования определять численные значения коэффициентов модели  $\varepsilon$  и  $\beta$  ( $\frac{dX}{dt} = [\varepsilon - \beta \cdot X] \cdot X$ ). Анализ модели (1), показывает, что коэффициенты  $\varepsilon$  и  $\beta$  можно выразить следующим образом [1]:

$$\varepsilon = \left( \mu - \frac{F}{V} + \frac{1}{\theta} \right), \quad \beta = K_4. \quad (2)$$

Расчет значений  $\varepsilon$  и  $\beta$ , необходимо производить по ходу процесса, используя систему уравнений (1). Отбор биомассы из аппарата начинается при достижении текущей концентрации  $X$  уровня  $\frac{\varepsilon}{2\beta}$ . Для определения объема биомассы, отбираемой из аппарата, используется выражение:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X^{(i)} - K_4 \cdot X^{(i)2} - \frac{F}{V} \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta} (X^{(i)} - X^{(i-1)}).$$

При условии, что весь прирост биомассы должен быть отобран во время отбора, можно записать [1]:

$$u = \frac{dX}{dt}. \quad (3)$$

Принимая во внимание нулевые начальные условия, т. е.  $X^{(i-1)} = 0$ , объем отбираемой биомассы определяется как [1]:

$$V_{\text{от}} = \frac{F}{\frac{u}{X^{(i)}} - \mu + K_4 \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta}}. \quad (4)$$

На основе описанной выше методики была разработана АСУ

отбором биомассы дрожжей из аппарата по ходу процесса культивирования [1]. Анализ результатов показывает, что использование такой системы в процессе управления дрожжевым производством позволяет снизить время культивирования на 1 час. Оптимальная концентрация  $X = 59 \text{ кг/м}^3$ , время отбора  $t'$  - начало 6 часа; время культивирования -  $t_k = 12 \text{ ч}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев В. В., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Одно решение задачи кинетики роста микроорганизмов // Проблемы химии и химической технологии: тез. докл. 2-ой региональной научной конференции. Тамбов, 1994. С.126 - 127.

2. Авцинов И. А., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов // Вестник ТГТУ, 2017. Т.23. № 3. - С.481 - 487.

3. Голубкина, Н. В. Математическая модель полупериодического процесса ферментации биомассы микроорганизмов / Н. В. Голубкина, Л. С. Гордеев, В. В. Ануфриев, Г. И. Щепкин, С. Г. Тихомиров // Информационные технологии и системы. Технологические задачи механики сплошных сред: тез. докл. республ. конф. - Воронеж: Воронеж. гос. ун - т, 1992. - С. 50.

УДК 681.5

О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
А.В. Овсянников, доц., канд. техн. наук (БГУ, г. Минск)

#### РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СПРОСА В ERP-СИСТЕМЕ R/3

Анализ практики функционирования промышленных и торговых систем показал, что прогнозирование экономических процессов требуется на нескольких уровнях системы управления такими системами (ERP и MES-системы). Это обусловлено тем, что спрос на продукцию и услуги может изменяться с разной периодичностью. В этом смысле для систем управления предприятием наиболее важными составляющими являются: иерархия прогнозов с горизонтом прогнозирования; структура формирования прогнозов; сочетание прогнозирования и планирования.

Лидер в производстве программных продуктов класса ERP – компания SAP (System Analysis and Program Development – системный анализ и разработка программ). Ее самый известный продукт — ERP-

система SAP R/3 (линейка R/1, R/2, R/3) ориентирован на крупные и средние предприятия.

В рамках ERP системы SAP присутствует компонент SAP SCM (Supply Chain Management – управление цепочками поставок), а в его состав входит модуль SAP F&R (Forecasting & Replenishment – прогнозирование и выполнение – система прогнозирования спроса и управления запасами на уровне потребитель-поставщик (производитель)). Он разбит на 4 основных блока: обработка входных данных; расчет прогноза; расчет потребности; оптимизация потребности.

Рассмотрены примеры особенности обработки входных данных в системе S/3 – коррекции (пиковых значений, истории заниженных из-за дефицита данных продаж, подряд идущих заниженных продаж).

Проведен расчет среднего прогноза с учетом не только поведения продаж в прошлом, но и их особенностей (6 групп по скорости оборачиваемости). Для этого использованы три основных группы факторов, влияющих на спрос: булевы факторы (событие состоит из двух возможных ситуаций (например, рекламные мероприятия, праздники, другие календарные события); метрические факторы: фактор имеет определённое значение в любой момент времени (например, динамика цены); фактор «Игнорировать» (исключение некоторых периодов истории продаж, т.к. они не являются правильными значениями, например, период ремонта части магазина и т.п.

УДК 658.261

Александров О.И. доц., канд. техн. наук;  
Кузьмицкий И.Ф. доц., канд. техн. наук; Лялько А.А. ассист  
(БГТУ, г. Минск)

## **ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМЕЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С УЧЕТОМ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ**

В настоящее время важной *проблемой* является определение рациональных режимов работы электроэнергетической системы (ЭЭС), т.е. определение наиболее целесообразных значений внутри- и межсистемных перетоков мощности и энергии в энергообъединении, которая подразумевает комплекс оптимальных условий существования режима при соблюдении ряда ограничений. В реализации транзитного потенциала Республика Беларусь исходит из положений и принципов Европейской Энергетической Хартии, целью которой является создание общего недискриминационного рынка электроэнергии на евразийском континенте посредством организации параллельной работы крупных энергетических объединений – UCTE, CENTREL, NORDEL и объединения энергосистем стран СНГ и ОЭС Балтии. Этому способствует

участие Беларуси в разработке крупных международных проектов «Восток – Запад в условиях функционирования Балтийского кольца», «Параллельная работа стран СНГ с ОЭС Европы».

Ведение оптимального режима в ЭЭС подразумевает решение комплекса задач, обеспечивающих минимальные издержки. В число этих задач входят такие, как выбор состава работающего оборудования, распределение нагрузок между станциями с минимизацией расхода топлива и с наименьшими потерями в электрических сетях, а также рациональная работа всего объединения с учетом межсистемных линий электропередачи. Формулировку данной проблемы можно описать с помощью *многокритериальной целевой функции*, которая включает в себя минимум отклонения значений перетоков от запланированных значений, минимум суммарного расхода топлива, минимум потерь мощности и энергии, как в энергосистеме, так и в межсистемных линиях электропередачи. Основные показатели, необходимые для принятия оптимальных решений, были разработаны ранее на основе системного анализа с охватом всех определяющих факторов, т.е. были созданы документы для их оперативного использования диспетчерским персоналом смежных энергосистем. В нашем случае речь идет о многолетнем оперативно-диспетчерском взаимодействии Системного Оператора Единой энергетической системы РФ (СО ЕЭС) и Объединенного диспетчерского управления Республики Беларусь.

Важным элементом такого управления является оптимизация баланса мощностей для межсистемных перетоков в ЭО, т.е. оптимизация текущего режима за отрезок времени, в течение усредненного часового (получасового) интервала, когда параметры сети можно считать условно постоянными. При таком допущении каждый интервал рассматривается как независимый, а осуществление баланса между производством и потреблением ЭЭ необходимого качества считается гарантированным. В этом случае задача управления ЭО в течение определенного интервала (например, суток) распадается на ряд последовательных задач, результаты решения которых в агрегированном виде дают искомым суточный график для ведения режима ЭО. Если при этом были выполнены ограничивающие условия по изменяющимся параметрам и, достигнут минимум затратных средств, то режим ЭО будет оптимальным. В данной постановке *подзадачей оптимизации баланса мощностей* понимается определение наиболее рациональных значений как внутренних, так и межсистемных потоков мощности и энергии для дефицитной энергосистемы. При дефиците мощности в ЭО, а в ряде случаев и нехватки топлива, выполняется оптимизация баланса мощностей и выработки ЭЭ в условиях взаимодействия со смежными энергосистемами, включая рынок зарубежных поставщиков. Для разных часовых интервалов (особенно во время сезона пиковых нагрузок) выполняется

закупка ЭЭ в соседних энергосистемах. В этом случае минимальный уровень заявляемой мощности определяется разностью между системным максимумом потребления и обеспеченной резервом мощностью собственных электростанций системы.

Экономически целесообразные величины закупаемой мощности и энергии определяются на основе технико-экономических и режимных расчетов с учетом технических, режимных, директивных и ценовых ограничений. Для расчетного уровня покупной мощности определяется оптимальная загрузка электростанций энергосистемы для различных часовых интервалов. Получаемое при этом рациональное значение дефицита мощности для разных нагрузок энергосистемы позволяет определить оптимальное количество покупной электроэнергии на планируемый расчетный период.

Одной из важных проблем взаимодействия смежных энергосистем является разработка рациональных принципов тарифообразования по потокам электроэнергии внутри каждой энергосистемы в составе энергообъединения, а также покупки электроэнергии от локальных источников и источников на возобновляемых энергоносителях. В настоящее время важной *проблемой* является определение рациональных режимов работы электроэнергетической системы в жестких условиях импорта электроэнергии из энергосистем Российской Федерации, Украины и Прибалтики. Кроме того, выполняется для ряда режимов экспорт в Литву на основании заключаемых контрактов, в которых оговаривается цена. Причем принципы формирования договорной цены не устанавливаются (цена договорная) и она является коммерческой тайной, однако в реальных условиях поставок оговариваются правила корректировки договорной цены в зависимости от различных режимных и директивных условий.

Положения контракта включают такие пункты как: срок (месяц, число) и объем поставки; названия ЛЭП, по которым осуществляется поставка; график суточной непрерывной поставки и коэффициент неравномерности в рабочий и выходные дни, предельные отклонения от согласованного минимального и максимального объема поставки электроэнергии, стоимость поставленной в расчетном периоде электроэнергии; штрафные санкции за неисполнение своих обязательств каждой из участвующих сторон; недопуск реэкспорта электроэнергии со стороны Покупателя. Тарифы на услуги по транзиту электрической энергии через энергосистему Беларуси на расчетный период рассчитываются исходя из объема необходимой выручки, обеспечивающей компенсацию экономически обоснованных затрат на содержание и эксплуатацию транзитной сети. Взаимоприемлемая величина стоимости определяется в результате двусторонних переговоров, приносящие равные относительные экономические выгоды для заинтересованных сторон.

УДК 681.5

Н.К. Брель, магистрант; О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **УЧЕТ ОСНОВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ**

При исследовании динамических свойств рафинеров был проведен учет основных переменных процесса размолки волокнистой массы.

Основной материальный поток характеризуется следующими информационными переменными. На входе рафинера: расход щепы (регулируется в соответствии с расходом пара); влажность щепы (в соответствии с технологией производства газетной бумаги перед смешением с водой на входе в рафинёр она должна быть в пределах 45-50%). Такая влажность достигается путём сжатия щепы в пробкообразователе шнекового типа на начальном этапе производства. Его конструкция обеспечивает постоянную влажность, поэтому измерению она не подвергнута. На выходе из рафинёра: давление в транспортной магистрали (контроль герметизации магистрали и камеры размолки рафинёра); степень помола (измеряется в лаборатории).

Вторичный поток: расход светлого фильтрата, т.е. отстоявшийся мутный фильтрат. В свою очередь, мутный фильтрат – это сконденсировавшийся пар, вода из обезвоживающих устройств и т.п. Его расход должен поддерживаться в соответствии с расходом щепы.

Вспомогательные потоки: расход рекуперативного пара (часть отработанного пара идет на подогрев щепы, другая часть на очистку в циклон и на рекуперацию. Расход измеряется для задания необходимого количества пара на подогрев); расход чистого пара (пар, подаваемый в первые 40–50 минут после пуска рафинёра. Необходим в соответствии с конструктивными особенностями рафинёра); давление чистого пара (пропарка осуществляется при избыточном давлении). Соответственно, информационные переменные: зазор между дисками (необходим в соответствии с технологическими особенностями производства бумаги); давление масла (гидравлическая система подачи масла осуществляет регулировку зазора между дисками. Основным элементом данной системы является четырёхходовой сервоклапан, обеспечивающий требуемый зазор), мощность двигателя рафинёра (обусловлено экономической составляющей. С помощью нее можно осуществлять расчет потребляемой электрической энергии, а также пределы допустимой нагрузки и т.д.).

## ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ MATLAB

Задачи оптимизации встречаются во многих областях науки и техники. В данной работе рассматриваются встроенные в систему Matlab методы оптимизации. Эти методы представлены в разделе Optimization Toolbox системы Matlab.

Особое внимание обращается на методы минимизации функций многих переменных с и без учета ограничений.

Рассматриваются следующие численные методы минимизации:

1. Метод Нелдера-Мида (симплекс метод).
2. Метод наискорейшего спуска, или градиентный метод.
3. Метод последовательного квадратичного программирования.

Первые два метода реализованы в функциях `fminsearch` и `fminunc` соответственно, которые решают задачу минимизации функций без учета ограничений.

Функция `fminsearch` является менее эффективным для задач с порядком больше, чем два. Однако, если задача является существенно разрывной, то данный алгоритм может быть более устойчивым.

Функция `fminsearch` часто может производить разрывные решения, в особенности если не рассматривается точка вблизи данного решения. `fminsearch` может давать только локальные решения.

Функция `fminunc` менее чувствительна к заданию начальных условий для поиска минимума. Точность расчета этим методом повышается, если дополнительно задать градиент функции.

Задача минимизации с учетом ограничений, которая решается с помощью функции `fmincon` выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_x (f(x)) \quad & c(x) < 0, \text{ceq}(x) = 0, \\ & A \cdot x < b, A_{\text{eq}} \cdot x = \text{beq} \\ & lb < x < ub, \end{aligned}$$

где  $x$ ,  $b$ ,  $\text{beq}$ ,  $lb$  и  $ub$  - векторы,  $A$  и  $A_{\text{eq}}$  - матрицы, и  $c(x)$  и  $\text{ceq}(x)$  есть функции,  $f(x)$  - функция, которая возвращает скаляр.  $f(x)$ ,  $c(x)$  и  $\text{ceq}(x)$  могут быть нелинейными функциями.

В данной функции есть возможность выбора типа алгоритма оптимизации. Все алгоритмы делятся на крупномасштабные (с меньшей вычислительной нагрузкой) и на среднемасштабные (с большей вычислительной нагрузкой). Имеется возможность задания вычисления гессиана.

УДК 681.5

О.К. Демидов, магистрант; О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ СХЕМ ШАХТНОЙ ВЕТИЛЯЦИИ**

В зависимости от числа и взаимного расположения выработок, подачи свежего и отвода загрязненного воздуха, рассмотрены центральные, фланговые и комбинированные схемы вентиляции [1].

Центрально–сдвоенная схема проветривания характеризуется расположением воздухоподающего и воздуховыдающего стволов в центре шахтного поля. Она содержит одну систему автоматического регулирования вентилятора главного проветривания, системы автоматического регулирования групповыми регуляторами расхода воздуха, системы автоматического регулирования расходом воздуха.

Фланговые (диагональные) схемы проветривания применяются при вскрытии шахтного поля в центре и на границах. В центре шахтного поля располагаются один или два ствола (как правило, воздухоподающие), а на границах шахтного поля – фланговые стволы (как правило, воздухоотводящие). Данная схема содержит четыре системы автоматического регулирования всасывающими вентиляторами главного проветривания, системы автоматического регулирования групповыми регуляторами расхода воздуха, системы автоматического регулирования локальными регуляторами расхода воздуха.

Комбинированные схемы проветривания шахт построены на сочетании в себе элементов центральных и фланговых схем с целью использования их преимуществ. В них в качестве воздухоподающего используется центральный ствол, а в качестве воздухоотводящих – центральные и фланговые стволы. Они содержат четыре системы регулирования всасывающими и нагнетающими вентиляторами главного проветривания, системы автоматического регулирования групповыми регуляторами расхода воздуха, локальные системы автоматического регулирования расходом воздуха.

Учет рассмотренных структур основных схем шахтной вентиляции позволяет обоснованно проектировать рациональную по составу систему автоматического управления объектами данного класса.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вентиляция шахт и рудников: учеб. пособие / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, О.А. Муха. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 266 с.



М. В. Клютко, асп.; В. П. Кобринец, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Система технического зрения (СТЗ) — это специальное сенсорное устройство, с помощью которого можно обеспечить получение качественных изображений, их последующую обработку и преобразование.

Электромеханические системы, снабженные СТЗ, достаточно широко и успешно применяются во многих отраслях промышленности на таких операциях, как контроль и отбраковка различных деталей и изделий по внешнему виду, сортировка и ориентированная укладка в кассеты деталей и заготовок, в том числе неупорядоченно движущихся по конвейеру или поступающих в таре навалом, сборка и комплектация узлов, сварка, окраска, упаковка изделий, монтаж электронных схем.

Функциональное назначение СТЗ электромеханической системой в зависимости от области и конкретных условий его применения довольно многообразно. Наиболее типичными функциями, выполняемыми СТЗ, являются следующие: регистрация наличия объекта в поле зрения датчика внешней видеоинформации – видеосенсора; подсчет числа объектов, находящихся в поле зрения или прошедших перед видеосенсором; считывание и расшифровка меток (цветовых или штриховых кодов, буквенно-цифровых символов, этикеток и других маркеров); обнаружение препятствий; измерения геометрических и физических параметров объектов; контроль изделий на наличие видимых дефектов, соответствие эталонам; классификация (распознавание) объектов; определение местоположения и ориентации объектов в рабочей зоне электромеханической системе; поиск нужных объектов на рабочей сцене; измерение скорости движущихся объектов; обеспечение информации для задания и коррекции траекторий рабочего органа в адаптивном режиме.

СТЗ, является одним из наиболее современных средств визуального контроля, гарантирует максимальную эффективность производства. Качественная система обеспечивает рост производительности, а также существенное упрощение выполнения поставленной задачи. Рациональное использование таких элементов визуального контроля, как система технического зрения, позволяет сэкономить количество расходуемых материалов, время работы и электричество.

А. Н. Полосин, доц., канд. техн. наук;  
К. А. Ворожбянов, магистрант  
(СПбГТИ(ТУ), г. Санкт-Петербург)

## **WEB-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОЛИМЕРНЫХ УПАКОВОК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ТЕРМОФОРМОВАНИЯ**

Целью производства полимерных упаковок (ПУ) для лекарственных препаратов и пищевых продуктов является изготовление высококачественных изделий, гарантирующих сохранность упакованной продукции без снижения ее потребительских свойств. Потребители предъявляют жесткие требования к прочности и барьерным характеристикам (паро-, кислородопроницаемости) ПУ, которые зависят от разнотолщинности (РТ) их стенок. Сложность управления качеством ПУ обусловлена многообразием их конфигураций и геометрических параметров, типов формуемых полимерных материалов (ПМ), способов термоформования (ТФ), неполнотой информации, вызванной, в частности, наличием только периодического контроля толщины и РТ, проводимого технологом. Поэтому актуальна разработка программного комплекса (ПК), позволяющего на базе математических моделей (ММ) ТФ решать задачи исследования и управления качеством многоассортиментных ПУ. Реализация ПК в виде web-приложения позволяет повысить скорость вычислений, обеспечить многопользовательский режим, упростить и снизить стоимость решения задач для пользователей за счет применения менее мощных компьютеров («тонких» клиентов) и отсутствия дополнительного программного обеспечения.

Web-приложение включает клиентскую и серверную подсистемы. Клиентская подсистема содержит интерфейсы формовщика и администратора, доступ к которым обеспечивается с помощью модуля авторизации. Серверная подсистема включает вычислительный блок (ВБ), блок визуализации результатов (БВР), банк данных характеристик процессов ТФ (БнД), базу данных учетных записей пользователей. В состав ВБ входят модуль структурно-параметрического синтеза ММ ТФ, взаимодействующий с библиотеками ММ стадий нагрева и формования и методов решения уравнений ММ, модули расчета полей параметров состояния (температуры, деформаций, скоростей деформаций, напряжений) ПМ на стадиях, профиля толщины стенок, средней толщины, индекса РТ и проницаемости ПУ [1]. БВР позволяет отобразить результаты в виде 3D модели заготовки с цветовой визуализацией (ЦВ) поля температуры в различные моменты времени

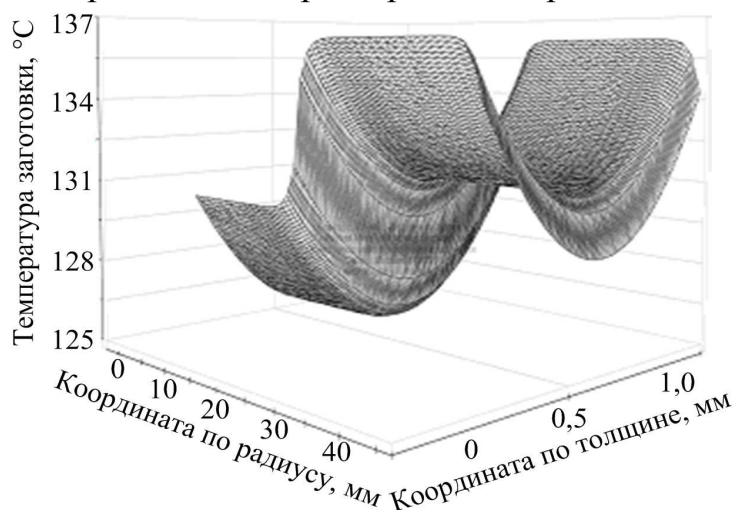
нагрева и 3D модели ПУ с ЦВ профиля толщины, 3D графиков полей параметров состояния (рис. 1), 2D графика профиля толщины, 3D графиков зависимостей характеристик качества от режимных параметров. БНД включает базы данных ПУ, ПМ, способов нагрева и формования, оборудования (зажимных рам, нагревателей, формирующих инструментов), регламентных диапазонов режимных параметров и позволяет перенастраивать приложение на различные характеристики процесса.

Используя соответствующий интерфейс на клиентской рабочей станции, формовщик задает тип ПУ, определяемый ее геометрическими характеристиками и типом ПМ, способ ТФ. Задание передается на web-сервер, на котором из БНД формируются характеристики (толщина, параметры свойств) ПМ, типы и параметры элементов агрегата для ТФ, набор режимных параметров (например, температуры зон нагревателей, время нагрева, скорость пуансона при механоформовании с предварительным ДДР нагревом) и диапазоны их варьирования. В зависимости от способа ТФ и конфигурации ПУ из библиотеки ММ стадий формируется система алгебродифференциальных уравнений (уравнения балансов, непрерывности деформаций, состояния ПМ) и краевых условий ММ процесса, для которой выбираются методы решения и формируется вычислительный алгоритм с автоматическим поиском устойчивых шагов расчета.

Тестирование web-приложения по данным ТФ пленок, листов из ПС и поливинилхлорида при изготовлении ПУ различных конфигураций с использованием разных способов нагрева и формования подтвердило его работоспособность в качестве инструмента анализа причинно-следственных связей в объекте и выбора режимов ТФ, обеспечивающих заданное или наилучшее (например, по РТ) качество ПУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Чистякова, Т.Б. ММ процесса механического ТФ для управления качеством полимерных изделий / Т.Б. Чистякова, А.Н. Полосин, Е.В. Кузьменков // Химическая технология. 2011. № 11. С. 693-702.



**Рисунок 1 - Поле температуры листа из полистирола (ПС) в конце нагрева (способ нагрева – двухзонный двухсторонний радиационный (ДДР))**

УДК 378.241.1

Я.И. Близнюк, магистрант (БПЦ, г. Минск);  
Д. Корвин (ТСП, г. Минск);  
С.С. Карпович, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АУДИОКНИГ**

В настоящее время большинство аудиокниг создаются вручную, и в результате внушительный сегмент изданий остаётся без своего аудиоаналога. Этот факт наиболее негативно сказывается в областях технической и учебной литературы. При этом для определенных категорий людей, страдающих, например, нарушениями зрения, подобный подход оказывается критичным, т. к. ограничивает их возможности в области самообразования и обучения в целом. Автоматизация процесса создания аудиокниг позволит обеспечить более широкий охват обучения и предоставить таким людям равные возможности в области образования, профессионального роста, духовного развития человека.

При этом необходимо учитывать, что исходная информация кроме существенной избыточности информации может иметь иные способы донесения информации до читателя, отличные от привычной текстовой формы. Наличие графической или табличной информации приводит к существенным сложностям перевода книг в аудиоформат.

На первом этапе для создания аудиокниги необходимо провести её качественный и количественный анализ с точки зрения табличной и графической составляющей.

В силу более детерминированности обработка табличной информации по сути представляет выявление зависимостей и трендов. Также возможно формирование итогового вывода по итогам анализа табличной информации без перечисления всех исходных данных. Однако последний подход приводит к существенному сужению смысла предоставления таблиц в литературе: у читателя будет отсутствовать возможность самостоятельного анализа исходной информации.

Автоматизация анализа графической информации из-за меньшей детерминированности представляет более серьезную задачу, решение которой связано с анализом текстовой части издания, имеющей ссылку на тот или иной рисунок. В данном случае предпочтительным является использование теории графов для выявления принадлежности изображения к какому-либо исчислимому множеству с принятием алгоритма действия в соответствии со связями, или рёбрами теории графов.

УДК 628.355

В.Н. Марцуль, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
О.С. Дубовик, вед. технолог; В.В. Иванович, инж.-технолог  
(УП «Минскводоканал», г. Минск)

### **СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ОСАДКОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛИЗАЦИИ**

Осадки очистных сооружений канализации являются отходами, которые неизбежно образуются в процессах очистки сточных вод населенных пунктов, эксплуатирующих централизованные системы водоотведения. Выбор направлений использования и технологий обработки осадков для конкретного объекта представляет собой достаточно сложную задачу.

В связи с планируемой реконструкцией Минской очистной станции УП «Минскводоканал» весьма актуальным является проведение сравнительного анализа вариантов проектных решений по обработке и использованию осадков.

Для анализа отобраны следующие варианты обработки осадков:

Вариант 1 – обезвоживание смеси избыточного активного ила и сырого осадка - сушка-сжигание;

Вариант 2 – термофильное сбраживание сырого осадка – обезвоживание смеси избыточного активного ила и сброженного сырого осадка– сушка- сжигание;

Вариант 3 – мезофильное сбраживание смеси избыточного активного ила и сырого осадка– обезвоживание сброженной смеси осадков– сушка– сжигание;

Вариант 4 – термофильное сбраживание смеси избыточного активного ила и сырого осадка– обезвоживание сброженной смеси осадков– сушка– сжигание;

Вариант 5 – обезвоживание смеси избыточного активного ила и сырого осадка–термогидролиз–мезофильное сбраживание смеси избыточного активного ила и сырого осадка–обезвоживание сброженной смеси осадков– сушка– сжигание.

Наибольшим количеством располагаемой энергии характеризуется вариант 5, предполагающий использование предварительного термогидролиза осадков перед мезофильным анаэробным сбраживанием. Так как при сравнении вариантов не учитывали ряд статей расхода энергии (в частности, на очистку отходящих газов, на перекачивание осадков), то абсолютные значения полезной энергии могут уточняться. Однако выявленные тенденции и сравнительные оценки вариантов сохраняются.

УДК 628.31

В.Н. Марцунь, доц., канд. техн. наук; Е.Г. Сапон, ассист.  
(БГТУ, г.Минск)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТА «SynergySorb ПС-1000»

Сорбент SynergySorb® ПС-1000 производится ООО «Синерджи-Ком» из гидролизного лигнина. Его характеристики соответствуют требованиям ТУ ВУ 490850780.005-2016. Сорбент предназначен для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, жидких нефте- и маслосодержащих отходов на поверхности воды, земли, а также при очистке емкостей и оборудования. Это один из немногих сорбентов, который производится в Беларуси из местного сырья. В процессах очистки сточных вод сорбент используется в качестве загрузки фильтрующих кассет.

Для выбора проектных решений по очистке сточных вод с использованием сорбента необходимо располагать информацией об его эксплуатационных характеристиках. Учитывая доступность данного материала, интерес представляет поиск новых областей применения для очистки сточных вод.

Цель работы состояла в определении гидравлических характеристик фильтрующих кассет с адсорбентом и оценке эффективности его применения для очистки сточных вод, содержащих компоненты фенолформальдегидных смол. В работе использовали сорбент и фильтрующие каскеты, предоставленные производителем. Характеристики фильтрующих кассет с сорбентом SynergySorb® ПС-1000 представлены в таблице.

**Таблица**

Высота слоя жидкости над фильтрующей каскетой (напор), м	Движущая сила процесса фильтрования, ΔР, Па	Скорость фильтрования, W, м/ч
0,25	2450	9,0
0,50	4900	14,3
0,75	7350	22,4
1,00	9800	32,2

Оценку эффективности применения сорбента для очистки сточных вод проводили на сточных водах ОАО «Стеклозавод «Неман». Сточные воды образуются в процессе очистки отходящих газов производства теплоизолирующих матов из стекловолокна. Сорбционная емкость составила по фенолу 0,111 г/г, по формальдегиду 0,060 г/г сорбента. Перед очисткой из сточной воды удаляли взвешенные вещества. По содержанию фенола и формальдегида очищенные сточные воды соответствуют требованиям, предъявляемым к воде, используемой для подпитки водооборотной системы газоочистной установки.

## **СОЗДАНИЕ ФИТОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ КОРОТКОГО ЦИКЛА РОТАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ИЛОВЫХ КАРТ**

Длительный период отсутствия в Беларуси нормативной базы, регламентирующей требования к качеству осадков сточных вод в зависимости от предполагаемого направления использования, привел к тому, что дальнейшее вовлечение данных отходов в хозяйственно-экономический оборот затруднено. В настоящее время, иловые площадки из сооружений по обработке превратились в объекты длительного хранения отходов, на которых накоплено уже свыше 9 млн. т осадков сточных вод.

Для оценки возможности выращивания ивы на неэксплуатируемых картах иловых площадок УП «Минскводоканал» в период 2014-2017 гг. проводили обследование сформировавшегося в естественных условиях древесно-кустарникового фитоценоза, в частности, ивы козьей (*Salix caprea*), ивы ломкой (*Salix fragilis*), ивы серой (*Salix cinerea*), ивы ушастой (*Salix aurita*). Определяли ежегодный прирост древесных кустарников на субстрате из накопленных осадков сточных вод, отбирали пробы для оценки величины фитонакопления тяжелых металлов (Cd, Cr, Zn, Cu, Fe, Ni) биомассой ивы.

В ходе экспериментальных исследований установили, что использование древесно-кустарниковых культур ивы рода *Salix* для проведения биологической рекультивации позволяет формировать фитомелиоративные системы краткого цикла ротации, в которых интервал от интенсивного роста до сбора биомассы составляет 3-4 года с количеством сборов не менее 6-7, и создавать на их основе источники местных топливно-энергетических ресурсов.

Краткий период ротации позволяет более интенсивно управлять фитомелиоративной системой с целью корректировки водного режима переувлажненных иловых площадок, обеспечить улучшение агрохимических характеристик плодородного слоя за счет способности растений ивы к избирательному накоплению тяжелых металлов.

УДК 543.08

И.Ю. Козловская, ст. преп., канд. техн. наук;  
В.Ю. Козловский, студ. (БГТУ, г. Минск)

### **ПОДГОТОВКА МЕТОДИК КОЛИЧЕСТВЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА К МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ И АТТЕСТАЦИИ**

В настоящее время в Республике Беларусь общие положения и требования, относящиеся к разработке, стандартизации методик выполнения измерений (МВИ) и метрологическому контролю за ними устанавливает ГОСТ 8.010-2013. Он распространяется на методики количественного химического анализа (МКХА) и количественные методики микробиологического анализа.

Целью работы являлась подготовка методик количественного химического анализа вредных веществ в воздухе рабочей зоны к метрологической экспертизе и аттестации.

Метрологическая экспертиза МВИ – это процедура анализа и оценивания правильности выбора методов и средств измерений, показателей точности, операций и правил проведения измерений, а также обработки их результатов в целях установления соответствия методики выполнения измерений, предъявляемым к ней метрологическим требованиям. На основании результатов метрологической экспертизы проводится аттестация МВИ. Аттестация МВИ – это исследование и подтверждение соответствия методик выполнения измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям.

В рамках работы к метрологической экспертизе и аттестации были подготовлены МКХА загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны (формальдегида, фенола, аэрозоля промышленных масел, диоксида кремния, соединений никеля, триэтанолamina) по заказу ЗАО «Гомельский ВСЗ». Показатели прецизионности были рассчитаны на основании экспериментальных данных, полученных и проанализированных в соответствии с требованиями СТБ ИСО 5725-1, СТБ ИСО 5725-2, СТБ ИСО 5725-6. Расчет стандартного отклонения повторяемости и стандартного отклонения промежуточной прецизионности выполнены по СТБ ИСО 5725-2.

По результатам работы получены положительные заключения метрологической экспертизы, а также свидетельства метрологической пригодности МВИ.



УДК 631.879.2

Н.В. Павловский, магистрант; В.Н. Марцуль, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ БИОГАЗОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ОСАДКОВ КОММУНАЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

Одним из наиболее перспективных вариантов использования осадков коммунальных сточных вод является энергетическое использование. К нему относятся сушка, сжигание, пиролиз, газификация и анаэробное сбраживание с получением биогаза. В настоящее время предпочтение отдается анаэробной обработке осадка с получением биогаза с последующим сжиганием его на когенерационных установках для получения тепловой и электрической энергии. Однако при разработке проектных решений по использованию осадков сточных вод с получением биогаза не учитывается фактический выход биогаза – биогазовый потенциал осадка.

Определение биогазового потенциала осадков коммунальных сточных вод г. Минска осуществляли согласно немецкой методике «VDI-RICHTLINIEN 4630», в соответствии с которой требуется проведение большого количества параллельных опытов с длительностью от 14 до 25 дней в зависимости от режима сбраживания.

В качестве объектов исследования были использованы осадки, которые отбирали на Минской очистной станции в сентябре–декабре 2017 г.: сырой осадок, уплотненный избыточный активный ил (ИАИ), смесь сырого осадка и уплотненного ИАИ.

Определение биогазового потенциала осуществлялось с применением следующих режимов: мезофильный режим сбраживания сырого осадка ( $T = 37^{\circ}\text{C}$ ); мезофильный режим сбраживания ИАИ с предобработкой (щелочной термогидролиз); мезофильный режим сбраживания смеси осадков (сырой осадок и ИАИ в соотношении 1:1 по с.в.); мезофильный режим сбраживания смеси осадков с предобработкой ИАИ; термофильный режим ИАИ ( $T = 55^{\circ}\text{C}$ ).

Наибольший выход биогаза был получен при мезофильном сбраживании сырого осадка и мезофильном сбраживании смеси осадков с щелочной предобработкой уплотненного ИАИ и составил 230 и 210 см<sup>3</sup>/г с.в. соответственно.

Следует отметить, что экспериментальные исследования проводили в статических условиях. При работе метантенка в проточном режиме выход биогаза увеличивается в 1,5–2 раза.

УДК 662.613.112

Ю.Г. Янута, вед. науч. сотр, канд. техн. наук;  
А.М. Абрамец, вед. науч. сотр, канд. техн. наук;  
(Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск)

## ПОДВИЖНОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО ЦЕЗИЯ В ЗОЛЬНЫХ ОТХОДАХ ОТ СЖИГАНИЯ ТОРФА

В Республике Беларусь принята долгосрочная программа, направленная на увеличение доли использования местного вида топлив. В программе заложен поэтапный переход на местные виды топлива, с увеличением их доли в общем объеме потребления энергоресурсов до 25%. В структуре местных видов топлив предпочтение отдается древесине и торфу.

Общие запасы торфа в Республике оцениваются в 4 млрд.т., при этом ежегодно добывается около 2-2,5 млн.т. торфа. К настоящему времени в объеме применения торфяных ресурсов наблюдается тенденция их топливного использования. Зольность добываемого торфа варьирует в широких пределах (от 2-5 % до 20-25%) и зависит от многих факторов [1]. Основными элементами торфяной золы являются Si, Ca, Mg, Fe, O [1]. При этом часть торфяных месторождений находится на территориях загрязненных радионуклидами. Удельная активность торфа, как правило, не превышает 80-100 Бк/кг, однако сжигание приводит к концентрированию активных материалов в золе.

Ранее проведенные исследования показали, что и  $Cs^{137}$  и  $K^{40}$  находятся, как правило, в ионообменных комплексах с органическими компонентами торфа, и связаны в первую очередь с карбоксильными и реже гидроксильными группами. Такие соединения устойчивы, и в естественном состоянии не склонны к разрушению, а катионы к вертикальной миграции. При сжигании происходит разрушение органической матрицы, что позволяет прогнозировать увеличение миграционной подвижности  $Cs^{137}$  и  $K^{40}$ . Предварительные исследования показали, что сжигание не приводит к росту подвижности радиоактивных катионов. Данный факт связан с фиксацией катионов в минеральной матрице. Однако, при сжигании торфа, температура в котлоагрегате не должна превышать температуры плавления золы. Для многих типов торфяной золы температура начала ее плавления составляет более 850 °С. Изучение поведения золы при температуре осуществляли путем сжигания торфа в муфельной печи при контролируемой температуре с последующим озолением недоокисленной органической составляющей раствором  $HNO_3/HCl$  в соотношении 3:1. Показано, что гранулометрический состав золы торфа является полидисперсным.

Исходная зола представлена как частицами имеющим неправильную форму, так и аморфными структурами. При температуре 400-450 °С в образце присутствуют оплавленные структуры, которые, вероятнее всего, и снижают подвижность  $\text{Cs}^{137}$  и  $\text{K}^{40}$  в золе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лиштван И. И., Король Н. Т. Основные свойства торфа и методы ее определения – Мн., «Наука и техника». – 1975. – 320 с.

УДК 544.726: 621.039.735

Л. Н. Москальчук, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### **НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ РАДИОНУКЛИДОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Для решения задач по очистке от радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  радиоактивных отходов АЭС, загрязненных природных экосистем (поверхностные водоемы, почвы и др.) особое внимание уделяется разработке и получению дешевых и эффективных сорбентов радионуклидов, обладающих свойствами и структурой, близкими к свойствам природных минералов-аналогов. Известно, что природные минералы (иллиты) с плотно сжатыми слоями и расширенными зонами на концах характеризуются высокими сорбционными свойствами по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  и др. радионуклидам.

Для получения наноструктурированных алюмосиликатных сорбентов радионуклидов многоцелевого назначения предлагается использовать накопившиеся в России и Беларуси запасы глинисто-солевых шламов (ГСШ) – промышленных отходов, образующихся на предприятиях химической промышленности Беларуси (ОАО «Беларуськалий») и других стран, которые при условии их химической обработки могут быть использованы для решения следующих технологических и экологических проблем атомной энергетики:

- 1) Обращение с радиоактивными отходами (РАО):
  - очистка жидких радиоактивных отходов (ЖРО) (порошковые и гранулированные сорбенты);
  - кондиционирование ЖРО (сорбционные добавки в цементную матрицу);
  - хранение и захоронение РАО («buffer & backfill materials» – сорбционные материалы для создания инженерных барьеров при строительстве и реконструкции ПЗРО, дополнительных барьеров

безопасности путем заполнения свободного пространства хранилища глинистым раствором при выводе из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов).

2) Очистка водных сред и природных экосистем (порошковые сорбенты); реабилитация радиоактивно загрязненных почв и территорий (сорбционная добавка в органоминеральные сорбенты, почвенные добавки), снижение уровня закисления природной воды в промышленно развитых регионах (порошковые сорбенты).

Научно-техническая новизна проекта заключается в получении на основе глинисто-солевых шламов сорбентов – аналогов известных природных минеральных сорбентов (бентонита, вермикулита, глауконита и др.) с заданными физико-химическими и высокими сорбционными свойствами.

Инновационность подхода состоит в том, что наноструктурированные алюмосиликатные сорбенты радионуклидов многоцелевого назначения предлагается получать из накопившихся запасов техногенного сырья – глинисто-солевых шламов, которые в настоящее время не используются. Объем глинисто-солевых шламов в шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» составляет более 110,5 млн. т (на 01.01.2016).

УДК 544.032

Т. Г. Леонтьева, ст. науч. сотр. (Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны»);  
Л. Н. Москальчук, проф., д-р техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ В КАЧЕСТВЕ СОРБЕНТОВ РАДИОНУКЛИДОВ**

В процессе переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларуськалий» образуются промышленные отходы – глинисто-солевые шламы, представляющие собой суспензию нерастворимого осадка в насыщенном растворе солей KCl и NaCl. В настоящее время глинисто-солевые шламы не перерабатываются, а накапливаются в шламохранилищах, представляющих собой специальные гидротехнические сооружения и занимающих площади свыше 1100 га плодородных земель Солигорского района.

Глинисто-солевые шламы являются источником загрязнения окружающей среды в результате проникновения рассолов в подземные воды и засоления почв. По данным на 01.01.2016 на ОАО «Беларуськалий» накоплено свыше 110,5 млн т глинисто-солевых шламов. Для решения проблемы утилизации данных отходов одним из возможных

способов их переработки может быть получение на их основе сорбентов радионуклидов.

Согласно результатам проведенных исследований установлено, что по физико-химическим свойствам глинисто-солевые шламы можно отнести к глинистым материалам. Нерастворимая часть глинисто-солевых шламов представлена алюмосиликатами, карбонатами и сульфатами. Основными глинистыми минералами в составе алюмосиликатов являются иллит и иллит смешанослойный. С использованием водной и водно-кислотной обработки из глинисто-солевых шламов получены образцы алюмосиликатных сорбентов.

Исследования сорбционных свойств образцов сорбентов показали, что степень сорбции  $^{137}\text{Cs}$  достигает 99% после 24 ч контакта с радиоактивным раствором. Значения потенциала связывания радиоцезия  $\text{RIP}(K)$ , характеризующего способность материала селективно сорбировать  $^{137}\text{Cs}$ , изменяются в интервале 3300–6700 ммоль/кг, значения коэффициента распределения ( $K_d$ ) составляют порядка  $10^3$ – $10^4$  л/кг, что свидетельствует о высокой сорбционной способности сорбентов в отношении  $^{137}\text{Cs}$ .

Благодаря наличию в составе сорбентов, полученных из глинисто-солевых шламов, такого глинистого минерала как иллит, способного селективно сорбировать  $^{137}\text{Cs}$  и необратимо его фиксировать данные сорбенты могут являться эффективными материалами для очистки жидких радиоактивных отходов и использования в качестве противомиграционных барьеров.

УДК 628.355

О.С. Дубовик, вед. технолог (УП «Минскводоканал», г. Минск)  
Р.М. Маркевич, доц., канд. хим. наук (БГТУ, г. Минск)

### **УСЛОВИЯ МИГРАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА В ИЛОВОЙ СМЕСИ**

В процессе биологической очистки сточных вод имеют место процессы миграции соединений фосфора из жидкой фазы в хлопки активного ила и обратное их высвобождение в жидкую фазу. Эти процессы происходят в сооружениях биологической очистки, во вторичных отстойниках при осветлении биологически очищенных вод, в сооружениях уплотнения и механического обезвоживания активного ила. Миграция фосфора имеет как биологическую природу – использование фосфора микроорганизмами как биогенного элемента, накопление в виде полифосфатов, – так и физико-химическую.

Направление перемещения соединений фосфора и их интенсивность определяются такими факторами как содержание растворенного кислорода, доступность органического субстрата (для фосфораккумулирующих организмов активного ила), а также значение рН, условия массообмена, продолжительность контакта осадка с осветленными водами и др. Чем больше соединений фосфора удерживается в твердой фазе, тем успешнее очистка.

Задача исследования заключалась в изучении динамики миграции фосфора между жидкой фазой и биомассой активного ила и в определении влияния уксусной кислоты и нефтепродуктов на процессы миграции фосфора.

Изучена динамика миграции фосфора при инкубировании в течение 1,5 ч смеси циркуляционного активного ила и осветленных сточных вод (1:1) без аэрации и последующем инкубировании в условиях аэрации (1,5 ч). При приготовлении иловой смеси отмечено увеличение концентрации фосфора фосфатного в жидкой фазе по сравнению с циркуляционным активным илом, т.е. часть фосфатов сорбирована на поверхности хлопка активного ила и смывается в результате смешивания активного ила с осветленными сточными водами. Установлено, что наиболее активное выделение фосфора из биомассы активного ила наблюдалось в течение 0,5 – 1,0 ч. Показано, что в условиях аэрации активный ил способен накопить фосфора до 6% от своей массы. Присутствие в сточных водах нефтепродуктов не только оказывает ингибирующее действие на активный ил и очистку сточных вод от органических соединений, но наряду с прочими факторами существенно влияет на биологическое удаление фосфора.

УДК 691

С.Г. Ковчур, В.Н. Потоцкий, А.С. Ковчур, А.В. Гречаников  
(ВГТУ, г. Витебск)

### **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ С ДОБАВКАМИ ОТХОДОВ ХВО**

Рациональное использование природных ресурсов в настоящее время приобретает особое значение. Решение этой актуальной народнохозяйственной проблемы предлагает разработку эффективных безотходных технологий за счёт комплексного использования сырья, что одновременно приводит к ликвидации огромного экологического ущерба, оказываемого хранилищами отходов. Данные о количестве железосодержащих отходов по областям Республики Беларусь показывают следующее: Гомельская область – 1176,89 тонн; Витебская

область – 114 138,54 тонн; Минская область – 3910,54 тонн; г. Минск – 7193,85 тонн. Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование как техногенного сырья при получении различного вида продукции и прежде всего строительного назначения.

Целью представленной работы является исследование составов неорганических железосодержащих отходов станций обезжелезивания и ТЭЦ, выявление возможности использования отходов в производстве тротуарной плитки.

В качестве сырья для производства тротуарной плитки методами вибропрессования или вибролитья используются: цемент, песок, вода и неорганические железосодержащие отходы. Неорганическими отходами станций обезжелезивания и ТЭЦ можно заменить часть исходного сырья в составе смеси.

Цветную тротуарную плитку изготавливали по технологии вибролитья. Сначала готовили цветную смесь (содержит отходы) и серую смесь. Затем в форму заполняли цветной смесью, толщиной 2,0–2,5 см, выравнивали за счёт вибрации, потом заполняли серой смесью, формовали плитку и сушили по обычной технологии.

Изготовлены тротуарные плитки с различным процентом вложения неорганических отходов, а также с различной толщиной цветного слоя. Установлено, что по физико-механическим свойствам тротуарная плитка соответствует требованиям СТБ 1071–2007 «Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров дорог», СТБ 1152–99 «Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные» и ГОСТ 27180-2001 «Плитки керамические».

УДК 691

А.В. Гречаников, А.С. Ковчур, С.Г. Ковчур, И.А. Тимонов  
(ВГТУ, г. Витебск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ ОТХОДОВ ХВО НА СВОЙСТВА ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ**

Решение задачи утилизации техногенных продуктов химводоподготовки предполагает разработку эффективных безотходных технологий за счёт комплексного использования сырья, что одновременно приводит к ликвидации огромного экологического ущерба, оказываемого хранилищами отходов. Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование как техногенного сырья при получении различного вида продукции и

прежде всего строительного назначения.

Изготовлены тротуарные плитки с различным процентом вложения неорганических отходов, а также с различной толщиной цветного слоя. Установлено, что по физико-механическим свойствам тротуарная плитка соответствует требованиям СТБ 1071–2007 «Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров дорог», СТБ 1152–99 «Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные» и ГОСТ 27180-2001 «Плитки керамические».

Гранулометрический состав компонентов также оказывает влияние на процесс формирования тротуарной плитки. Основную массу цементных составов, как правило, составляют зерна, имеющие размеры от 5–10 до 30–40 мкм. Качество помола материала определяется наличием остатков на ситах с размерами ячеек 0,2; 0,08 или 0,06 мм.

Для изготовления плитки методами вибропрессования или вибролитья используется цемент ПЦ-500 (Д0), характеризующийся тонкостью помола сквозь сито № 008, не менее 85,0 %.

При производстве цветной тротуарной плитки используя технологию вибролитья, заменяя пигмент-наполнитель неорганическими отходами станций обезжелезивания и ТЭЦ, дисперсность этих отходов не превышает 150 мкм.

Исследовалось влияние гранулометрического состава добавок неорганических отходов на процесс формирования тротуарной плитки. Установлено, что гранулометрический состав неорганических отходов станций обезжелезивания и ТЭЦ позволяет их использовать при производстве тротуарной плитки.

На процесс формирования тротуарной плитки оказывает влияние процент вложения отходов, их дисперсный и зерновой состав.

Микроструктура образцов показала, что увеличение процента вложения крупнодисперсных неорганических отходов при производстве тротуарной плитки приводит к появлению большей дисперсности структуры плитки. Мелкозернистая добавка неорганических отходов позволяет получить более плотную структуру. Рекомендованный процент вложения мелкодисперсных отходов составляет 7–10 %.



УДК 621.762

В.К. Шелег (БНТУ, г. Минск);  
А.С. Ковчур, С.Г. Ковчур, В.Н. Потоцкий (ВГТУ, г. Витебск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ ОТХОДОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Нами были изучены процессы никелирования на предприятиях Витебской области, а также сделан химический анализ образующихся никельсодержащих отходов. Проведены лабораторные экспериментальные исследования по осаждению ионов никеля из модельных водных растворов электрохимическим, сорбционно-ионообменным и реагентным методами. Дальнейшие экспериментальные исследования проводились реагентными методами с использованием сульфатных, гидроксидных, карбонатных и фосфатных реагентов, а также под действием раствора аммиака.

Сульфатный метод позволил практически полностью выделить никель, но в процессе переработки жидких отходов происходит выделение сероводорода с неприятным запахом. В производственных условиях потребуются дополнительные затраты на мероприятия по охране окружающей среды и охране труда.

Для осаждения ионов никеля в виде гидроксидов использовался 40 % раствор NaOH. Никель осаждался в виде зеленого  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ . Однако, аморфная структура осадков затрудняет их отделение от жидкой фазы, что приводит к значительному удорожанию технологического процесса переработки.

Под действием водного раствора аммиака, никель не удалось осадить полностью. Кроме того, водный раствор аммиака имеет неприятный резкий запах, и этот метод также не рекомендуется использовать для разработки технологии утилизации никельсодержащих жидких отходов.

Предпочтение следует отдавать реагентному методу с использованием 40 % раствора карбоната натрия. В результате образуются основные карбонаты никеля. Реагентный метод с карбонатным осаждением дает более компактные, чем гидроксидный, осадки, а также более экологически безопасен.

Ряд проведенных экспериментов, математическое моделирование и оптимизация процесса осаждения никеля позволяет получить максимальный выход никеля с минимальными затратами реагента-осадителя, используя раствор карбоната натрия с концентрацией 90 г/л.

УДК 504.064.47: 628.386

О.С. Залыгина, доц., канд. техн. наук;  
В.И. Чепрасова, асп.; К.Ю.Шаметько, студ. (БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЖЕЛЕЗА НА КОЛОРИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИГМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ**

В настоящее время по площади покрываемых деталей никелирование занимает второе место, уступая только цинкованию. Характерной особенностью процесса никелирования является большой объем потерь солей никеля с отработанными электролитами никелирования (ОЭН), которые в большинстве случаев отводятся в общую систему очистки сточных вод. Кроме этого, никель характеризуется высокими канцерогенными свойствами и имеет низкие значения ПДК. Поэтому целью работы являлось извлечение никеля из ОЭН в виде соединений, которые могут быть использованы в качестве пигментов, поскольку в настоящее время Республика Беларусь закупает их за рубежом.

Ранее были определены условия осаждения ионов никеля из ОЭН в виде соединений, которые обладают хромофорными свойствами, установлены их фазовый и элементный состав, подобраны температуры термообработки и определены колористические характеристики. Однако ионы железа, присутствующие в ОЭН в качестве загрязняющей примеси вследствие контакта электролита с обрабатываемыми деталями, могут оказывать влияние на колористические характеристики получаемых пигментов. На основании исследований, проведенных на ОЭН с различным содержанием  $Fe^{3+}$  (от 0 до 2 г/л) было установлено, что в необожженных образцах независимо от вида осадителя увеличение концентрации  $Fe^{3+}$  приводит к смещению цвета получаемого пигмента из области зеленого в область желтого оттенка. При использовании в качестве осадителя гидроксида натрия содержание  $Fe^{3+}$  не влияет на цвет образцов после термообработки, т.к. образуется оксид никеля черного цвета. При использовании в качестве осадителя фосфата натрия цвет образцов после термообработки при повышении концентрации  $Fe^{3+}$  смещается из желтой области в коричневую.

Таким образом, цвет пигментов, полученных из отработанных электролитов никелирования, зависит как от вида осадителя и условий термообработки, так и от содержания примесей железа. Все полученные пигменты могут использоваться в керамической промышленности для получения цветных глазурей и мастик.

УДК 628.31

Л.А. Шибека, доц., канд. хим. наук, Команяк В.А., студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Очистка сточных вод предприятий, осуществляющих окраску и отделку тканей, является трудной задачей. Это обусловлено образованием сточных вод сложного состава. Наименование и содержание загрязняющих веществ в таких сточных водах, зависит от типа окрашиваемого полотна, рецептуры красильно-отделочных и закрепляющих композиций, количества промывок полотна. Большой ассортимент и разнообразная цветовая гамма выпускаемой продукции на предприятиях приводит к тому, что указанные сточные воды характеризуются непостоянством качественного и количественного состава даже в течение одной рабочей смены.

Цель работы – сравнительный анализ применения различных материалов в процессах очистки сточных вод красильно-отделочных предприятий.

В работе использовались природные глины различных месторождений, торфяная и древесная зола, образующиеся при различных условиях сжигания соответствующего топлива в промышленных и бытовых теплоэнергетических установках.

Исследования проводили на сточных водах, образующихся на одном из предприятий текстильной промышленности Республики Беларусь. Эффективность процесса доочистки сточных вод с использованием указанных материалов оценивали по величине оптической плотности раствора до и после взаимодействия фаз.

Установлено, что наилучшей способностью доочищать воды от красящих веществ (а именно они обуславливают цветность сточных вод) обладает древесная зола и зола, образующаяся при сжигании торфа в бытовых условиях. Максимальная степень очистки при использовании данных материалов может достигать 77%. Несколько хуже процесс очистки протекает в случае применения торфяной золы, образующейся при сжигании топлива в промышленных установках. Наихудшие результаты наблюдаются при использовании глин, различных месторождений (степень очистки не превышала 62%).

Выявленные закономерности свидетельствуют о возможности использования зольных остатков, относящихся в настоящее время к отходам, в процессах доочистки сточных вод красильно-отделочных производств.

УДК 621.357

А.В. Лихачева, доц., канд. техн. наук;  
Д.В. Шавко, студ.; Н.Н. Рылко, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ РАСТВОРОВ ТРАВЛЕНИЯ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Высокие концентрации солей железа и кислоты в отработанных растворах травления черных металлов позволяют использовать их в качестве вторичного сырья.

В настоящее время разработаны различные технологии использования отработанных травильных растворов.

Целью работы являлось провести сравнительный анализ способов переработки отработанных растворов травления черных металлов.

В работе проводилось сравнение переработки отработанных растворов травления в пигмент, сорбент, коагулянт, железный купорос, мелиорант, вяжущие материалы.

Сравнение вариантов переработки отходов проводилось по результатам составленных материальных и энергетических балансов производства, расчета экономических затрат на сырье, вспомогательные материалы и оборудование.

Согласно полученным результатам исследований можно отметить, что наименьшими экономическими затратами обладает процесс переработки отработанных травильных растворов гальванического производства в железный купорос. Именно поэтому данную технологию переработки используют на ОАО «Речицкий метизный завод» и ОАО «Белорусский металлургический завод».

Наиболее выгодным по энергопотреблению является процесс переработки отработанных травильных растворов в коагулянт, а процесс переработки в пигмент является самым энергоемким.

Из общего сравнения можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным является процесс переработки отработанных травильных растворов гальванического производства в мелиорант. Данный процесс реализуется по безотходной технологии и без потребления воды, а также относится к числу менее энергоемких процессов. Однако, этот способ переработки подходит только для отработанных травильных растворов, содержащих уротропин.

Подход, использованный для сравнения различных вариантов переработки отходов, может быть использован на предприятиях при выборе способа и направления переработки того или иного отхода.

УДК 621.357

А.В. Лихачева, доц., канд. техн. наук;  
Н.Н. Рылко, студ.; Д.В. Шавко, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ОАО «РЕЧИЦКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД»**

В последнее время отходы производства все чаще рассматривают в качестве возможного источника сырьевого ресурса для производства товарной продукции. Объектом исследования в данной работе являлись железосодержащие отходы.

Цель работы – обоснование возможности получения железосодержащих пигментов из отходов, образующихся в производственной деятельности ОАО «Речицкий метизный завод».

При выполнении работы был проведен комплекс исследований по изучению способов получения железосодержащих пигментов из производственных отходов ОАО «Речицкий метизный завод». Для этого были отобраны пробы отходов и определен их состав. Показано, что прокаленные отходы, такие как: гальваношлам, железный купорос, образующийся при регенерации солянокислых отработанных травильных растворов и железосодержащий отход, образующийся при регенерации флюса, могут использоваться в качестве сырьевого ресурса для получения железосодержащих пигментов.

Исследованы различные варианты получения пигментов из указанных отходов.

На основании экспериментальных данных было определено, как технологические параметры влияют на выход и качество получаемых материалов.

Показано, что предварительная промывка отходов отрицательно сказывается на показателях качества полученного материала, а промывка прокаленного материала улучшает их. Также был определен температурный интервал и продолжительность прокаливания, в зависимости от которых менялись технологические показатели. Были сравнены условия прокаливания: постепенное наращивание температуры до требуемого значения; прокаливание материала при требуемой температуре весь период обработки; отсутствие стадии предварительной сушки отходов.

Полученные результаты исследований легли в основу разработанной технологии получения пигментов из железосодержащих отходов. Свойства пигментов, полученных по предложенной технологии, не уступают пигментам, полученным на предприятиях Российской Федерации.

УДК 504.064.47:621.357.7

М.Л. Кравченко, магистрант;  
А.В. Лихачева, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦИНКОВАНИЯ**

В зависимости от поставленных технологических целей, методы обработки отработанных электролитов гальванического цинкования (ОЭЦ) можно разделить на три основные группы: методы регенерации; методы нейтрализации; другие методы обработки с целью использования содержащихся в них ценных химических продуктов.

В работе сравнивали следующие способы обращения с отработанными электролитами цинкования: совместная очистка со сточными водами на локальных очистных сооружениях реагентным методом с использованием ФФГ (ферроферригидрозоля), регенерация отработанных электролитов цинкования, переработка с получением пигментов.

Сравнительный анализ разных способов обращения с ОЭЦ проводили по двум вариантам.

По первому варианту, для сравнения трех способов использования ОЭЦ были составлены материальные и энергетические балансы данных процессов, а также рассчитаны экономические затраты на сырье, вспомогательные материалы и оборудование.

По второму варианту, в основе сравнительного анализа лежал метод экспертных оценок.

Таким образом, было установлено, более предпочтительным способом использования ОЭЦ (из рассмотренных) является очистка совместно со сточными водами на локальных очистных сооружениях с применением ФФГ, не смотря на то, что данный метод характеризуется образованием большого количества осадка (ферритизированного гальваношлама), который исходя из его химического состава может использоваться при производстве строительных материалов.

Метод регенерации ОЭЦ характеризуется наибольшими энергопотреблением и материалоемкостью.

Метод получения пигментов на основе ОЭЦ характеризуется водоемкостью, а большое водопотребление в свою очередь обуславливает образование фильтрата и промывных сточных вод.

В зависимости от поставленных целей и приоритетности решаемых задач, на практике могут быть использованы все три способа обращения с ОЭЦ.

М. Л. Кравченко, магистрант;  
А.В. Лихачева, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ БЛЕСКООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСАЖДЕНИЕ ИОНОВ ЦИНКА ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦИНКОВАНИЯ**

Проведенные ранее исследования показали, что отработанные электролиты гальванического цинкования (ОЭЦ) могут использоваться в качестве сырьевого ресурса для получения цинксодержащих пигментов белого цвета. В основе рассматриваемого способа получения пигментов лежит метод осаждения соединений цинка из ОЭЦ 1n раствором фосфата натрия. Также предварительно было установлено, что примеси, содержащиеся в отработанных электролитах цинкования: блескообразователи и продукты их разложения, примеси соединений железа и др. – могут влиять не только на технологические параметры осаждения ионов цинка из отработанных электролитов цинкования, но и на качество получаемых пигментов.

Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния блескообразователей на качество пигментов получаемых из ОЭЦ.

Объектами исследования являлись модельные отработанные электролиты цинкования (моделировали отработанные электролиты цинкования, образующиеся на ОАО «Амкодор»): С ( $ZnCl_2$ ) = 70 г/л, С ( $NH_4Cl$ ) = 100 г/л, С (СБЦ-1) = 100–10000 мг/л или С (СБЦ-2) = 100–6000 мг/л.

Исследовалось влияние таких блескообразователей, как СБЦ-1 и СБЦ-2, которые чаще всего на практике используются в гальванических производствах предприятий Республики Беларусь. В ходе исследований было установлено, что блескообразователи сильно отличаются по составу, а именно: СБЦ-1 – водный раствор карбоксильных соединений и ПАВ; СБЦ-2 – водный раствор карбонильных соединений и ПАВ.

В ходе исследований было установлено влияние концентрации блескообразователя в ОЭЦ на следующие технологические параметры осаждения ионов цинка из ОЭЦ: рН, соотношение осадителя к осаждаемому металлу, время осаждения.

Из полученных результатов следует, что блескообразователи влияют не только на качество получаемых пигментов, но и на технологические параметры процесса получения пигментов из ОЭЦ. При этом степень воздействия зависит от состава присутствующего в ОЭЦ блескообразователя.

Т.Л. Сулейко, асист.;  
Е.И. Семёнова, доц., канд. техн. наук  
(НУПТ, г. Киев)

## **НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Проблема экологического состояния является актуальной для всех водных объектов постсоветского пространства. Возникла тенденция к значительному загрязнению водных объектов вследствие неупорядоченного отведения сточных вод от населенных пунктов и хозяйственных объектов.

Для подавляющего большинства промышленных предприятий сброс загрязняющих веществ существенно превышает установленный уровень предельно допустимого сброса. И пищевая промышленность (в том числе и молочная отрасль) в данном случае не есть исключением. Много лет молокоперерабатывающие и другие предприятия пищевой промышленности практически не имели мотивации к серьезным практическим действиям в плане экологизации производства, рациональной утилизации или очистки отходов [1].

Для исправления данной ситуации необходимо применение инновационного подхода к созданию принципиально новых и совершенствование существующих природоохранных технологий, в том числе и биологической очистки сточных вод.

Однако, биологический способ очистки, как наиболее эффективный именно для сточных вод богатых органическими загрязнениями, имеет и ряд недостатков: большие объемы очистных сооружений, значительные капитальные и текущие расходы, высокую санитарно-эпидемиологическую опасность. Ликвидировать данные недостатки возможно путем использования способов интенсификации процесса очистки сточных вод [2].

Целью работы было определение параметров процесса аэробной ферментации с использованием интенсификации активного ила электрическим током.

Проведены исследования по утилизации сточных вод типичного представителя молокоперерабатывающей отрасли. Процесс очистки сточных вод осуществлялся в непрерывном режиме (табл. 1).

Были проведены опыты по определению дегидрогеназной активности (ДГА) ила (табл. 2). Как известно, значение ДГА используется для контроля интенсивности процесса очистки.



**Таблица 1 - Основные показатели процесса очистки сточной воды молокоперерабатывающего предприятия**

Вид сточной воды	ХПК нач.	ХПК кон.	Продолжительность аэрации, ч	Степень очистки, %
	мг О/дм <sup>3</sup>			
Сточная вода молокозавода	1 500	55	48	96,3

**Таблица 2 - Зависимость дегидрогеназной активности ила от продолжительности аэрации сточной воды**

ДГА, мг/г	Продолжительность аэрации, ч
23,5	12
24,5	24
24	36
24	48

Электроток стимулирует размножение клеток и усиливает ферментативную (дегидрогеназную) активность организмов активного ила.

Целью исследования было определение параметров электротока, приводящие к максимальному увеличению удельной активности ила. Подача электрического тока осуществлялась импульсно, но многократно. Полученные результаты приведены в таблице 3.

**Таблица 3 - Динамика дегидрогеназной активности ила в процессе стимулирования электрическим током**

Мощность электрического тока, мкВт	Значение ДГА ила (мг/г)	Удельное изменение ДГА
5	37,5	1,47
10	46,5	1,90
15	50,0	2,13
20,0	41,5	1,69

Итак, воздействие электротока мощностью 15 мкВт на организмы активного ила вызывало повышение их дегидрогеназной активности в 2,13 раза. Данный факт интенсификации нашел свое отображение на ускорении процесса очистки - пребывание сточной воды в очистном сооружении сократилось до 36 ч (на 25%).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Л.Б. Проблеми екологізації діяльності підприємств харчової промисловості / Л.Б. Скляр // Вісник соціально-економічних досліджень. – 2010. – № 40. – С. 394-397.
2. Тозова Т.А. Системы биологической очистки сточных вод - технологии новые и новейшие /Т.А. Тозова, Н.А. Денисова // Аква-Терм.— 2002. — №3. — С.91-92.