

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 628.337(476)

**ЯЛОВАЯ Наталья Петровна**

**ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА  
ПРИРОДНЫХ ВОД  
ЗАБОЛОЧЕННЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальностям

05.17.01 – технология неорганических веществ,  
05.17.03 – технология электрохимических процессов и защита от коррозии

Минск, 2009

Работа выполнена на кафедре инженерной экологии и химии Учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Научный руководитель – **Строкач Петр Павлович**,  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры инженерной экологии и  
химии Учреждения образования  
«Брестский государственный технический  
университет»

Официальные оппоненты: **Дормешкин Олег Борисович**,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технологии  
неорганических веществ и общей химической  
технологии Учреждения образования  
«Белорусский государственный  
технологический университет»

**Хмыль Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
проректор по учебной работе Учреждения  
образования «Белорусский государственный  
университет информатики и  
радиоэлектроники»

Опонирующая организация – Учреждение образования  
«**Белорусский национальный технический  
университет**»

Защита состоится «02» июня 2009 г. в 10.00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при УО «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, корп. 4, факс (017) 227-62-17, тел. (017) 227-15-44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «29» апреля 2009 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций Д 02.08.02,  
доктор технических наук



А.Э. Левданский

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Государственной программой по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» на 2006-2010 годы в Республике Беларусь должна быть решена одна из важнейших социальных задач – обеспечение населения качественной питьевой водой и создание благоприятных условий для его проживания, особенно в сельской местности. Поэтому большую актуальность и необходимость приобретает разработка и внедрение ресурсосберегающих экологических технологий улучшения качества воды.

В водоподготовке одним из перспективных методов очистки воды является электрокоагуляция, позволяющая эффективно очищать природную воду от минеральных, органических и биологических загрязнений.

Методы очистки природных вод химическими реагентами – алюминиевыми коагулянтами – весьма чувствительны к колебаниям ионного состава, щелочности, температуры и рН воды, поэтому при несоблюдении строго определенных условий процесса коагуляции, питьевая вода, направляемая потребителю, характеризуется повышенным содержанием остаточного алюминия.

С позиций гигиенической безопасности применение электрохимически синтезированного алюминиевого коагулянта, приготовленного в электролизере с растворимым алюминиевым анодом, не приводит к возрастанию опасности для здоровья населения, т.к. содержание ионов алюминия в очищенной воде после электролиза не превышает предельно допустимых концентраций.

Электрокоагуляция позволяет осуществлять процесс очистки воды в компактных, автоматически действующих и легко обслуживаемых установках, что особенно удобно для небольших автономных объектов, например, агрогородков, баз отдыха, оздоровительных лагерей и т.п.

Эффективное внедрение метода электрокоагуляции в технологию водоподготовки требует всестороннего изучения условий проведения электрокоагуляционного процесса, исследования параметров, влияющих на электрохимическое растворение алюминиевого анода и удаление из воды загрязнений электрогенерированным коагулянтом с высокой сорбционной способностью.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационная работа «Электрокоагуляционная очистка природных вод заболоченных районов Республики Беларусь» выполнена на кафедре инженерной экологии и химии Брестского государственного технического

университета в соответствии с утвержденным научным планом УО «Брестский государственный технический университет» на 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010 гг., в рамках Региональной программы прикладных исследований «Мониторинг водной среды»: ГБ № 95/18 «Мониторинг и прогнозирование качества водных ресурсов, разработка перспективных технологий и сооружений очистки воды».

Работа соответствует приоритетным направлениям Республиканской программы первоочередных мер по улучшению снабжения населения питьевой водой (№ 871, от 02.06.1998), Государственной программы по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь № 52 от 17.01.2002): обеспечение бесперебойного снабжения населения качественной питьевой водой, совершенствование технологии подготовки питьевой воды и решение вопросов по обеспечению сельского населения качественной питьевой водой.

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящей диссертационной работы состоит в изучении физико-химических особенностей электрокоагуляционной очистки маломинерализованных природных вод и разработке технологии электрокоагуляционной очистки воды источников водоснабжения заболоченных районов Республики Беларусь в электролизере с растворимым алюминиевым анодом, позволяющей эффективно очищать природные воды различного состава и дисперсности до нормативных показателей.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи научного и прикладного характера:

- проведены комплексные систематические исследования и определены физико-химические и электрические параметры процесса электрохимического растворения алюминиевого анода, электрохимического синтеза коагулянта и удаления загрязнений из воды электрокоагуляцией;
- выявлены условия эффективной комплексной очистки природной воды от мутности, цветности, соединений железа, кремния, кислорода, фитопланктона и микроорганизмов и определена природа физико-химических процессов, ответственных за удаление загрязнений из воды;
- разработана технология электрокоагуляционной очистки маломинерализованных природных вод с применением электролизной установки для хозяйственно-питьевых целей;
- проведены производственные испытания метода, технологии и установки электрокоагуляционной очистки воды и подготовлены рекомендации для практического применения.

Объектом диссертационного исследования является процесс электрокоагуляционной очистки маломинерализованных природных вод.

**Положения диссертации, выносимые на защиту.** Результаты комплексного систематического исследования процессов электрокоагуляционной очистки природных вод в электролизере с растворимым алюминиевым анодом, включающие:

1. Новые экспериментальные данные по анодному растворению алюминия и влиянию на эффективность этого процесса анионного и катионного состава природной воды, температуры, pH, выбора катодного материала, плотности тока, скорости потока воды, позволившие определить оптимальные условия электрохимического синтеза коагулянта гидроксида алюминия.

2. Экспериментально обоснованные рекомендации по условиям обеспечения высокого выхода по току процесса анодного растворения алюминия, постоянства скорости генерирования коагулянта, длительной эксплуатации электролизера, включающим активацию алюминиевого анода путем введения в состав воды хлорид-ионов и химическое растворение алюминия параллельно с анодным растворением.

3. Экспериментальное обоснование условий (дозы алюминия, плотности тока, длительности очистки, pH, температуры, ионного состава) электрокоагуляционной очистки природной воды в объемном пространстве электролизера, обеспечивающих улучшение микробиологических, химических и органолептических свойств и показателей качества природной воды.

4. Разработку технологии электрокоагуляционной очистки природных вод с активацией анодного растворения алюминия путем введения в электролизер раствора NaCl и результаты апробаций метода, технологии и установки электрокоагуляционной очистки воды в условиях производства.

**Личный вклад соискателя.** В диссертационной работе изложены результаты исследований, полученные соискателем лично. Участие автора в исследованиях, включенных в диссертационную работу, состояло в непосредственном проведении эксперимента, обобщении полученных данных, формулировании выводов, подготовке научных публикаций. Научным руководителем оказывалась консультативная помощь по методологии и выбору наиболее значимых направлений исследований.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты выполненной диссертационной работы доложены и обсуждены на XXI Научно-технической конференции в рамках проблемы «Наука и мир», Брест, БрПИ, 1994; Научно-технической конференции, посвященной 30-летию БрПИ, Брест, БрПИ, 1996; Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Молодежь и научно-технический прогресс», Брест, БрПИ, 1997; Международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономических социальных преобразований в условиях рыночных отношений, Биберах-Брест-Ноттингем, 1998; Об-

ластной научно-технической конференции «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», Брест, БрГТУ, 2001; V Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2005 года: экологические проблемы 21 века», Минск, МГЭУ, 2005; VIII Международной научно-методической конференции «Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества», Витебск, ИСЗ, 2005; Областной научно-технической конференции «Новые образовательные технологии в экологической подготовке студентов», Брест, БрГТУ, 2005; Международных научных заседаниях молодых ученых, Республика Польша, Белосток, Белостокская политехника, 25-26.04.06, 21-23.05.07, 14-16.05.08.

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 12 научных работах, из них 7 – статьи в научных рецензируемых журналах, 3 – статьи в сборниках материалов конференций, 1 – тезисы доклада, 1 – патент (6 статей опубликовано в научных изданиях РБ, рекомендованных ВАК РБ для опубликования диссертационных исследований, общим объемом 2,1 авторских листа).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, основной части, представленной 5 главами, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 152 страницы. Объем, занимаемый 43 иллюстрациями, 37 таблицами, 96 формулами и Приложением составляет 47 страниц. Библиографический список содержит 166 наименований на 12 страницах, в том числе 12 авторских публикаций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, ее научная и практическая значимость, необходимость проведения исследования.

**В первой главе** рассмотрены теоретические основы процесса электрокоагуляционной очистки природных вод, и представлен анализ ее современного состояния.

На основе проанализированных теоретических и экспериментальных данных многих исследователей<sup>1</sup> установлено, что электродный процесс с применением растворимых в водных растворах металлических электродов сопровождается совокупностью электрохимических, физико-химических и химических реакций: электрофорезом, электролизом, анодным растворением металлов, катодным восстановлением растворенных в воде органических и

<sup>1</sup> Работы Г.В. Акимова, П.А. Акользина, Л.И. Антропова, И.Г. Краснобородько, А.И. Левина, В.М. Рогова, И.Л. Розенфельда, В.В. Скорчелетти, Н.Д. Томашова, С.В. Яковлева и др.

неорганических веществ, электрокоагуляцией, электрофлотацией, адсорбционными процессами на электродах, скорость которых, согласно законам электрохимической кинетики, определяется общим значением потенциала на границе «металл–раствор», составом раствора и условиями диффузии компонентов или продуктов реакции в растворе.

На скорость электродного процесса оказывает влияние температура, ионный состав электролита, чистота электродного материала, скорость потока воды в межэлектродном пространстве, величина pH.

Однако аналитический обзор литературы показал отсутствие комплексных систематических исследований процесса электрокоагуляционной очистки природных вод, а приведенные данные относятся в основном к электролизу металлов в неподвижных высококонцентрированных водных растворах, что не позволяет прогнозировать протекание процессов в маломинерализованных природных водах, к которым относится большинство природных вод заболоченных районов Республики Беларусь.

**Во второй главе** описаны объекты, методы и методики исследования. Приведены результаты экспериментальных данных по анодному растворению алюминия и влиянию на эффективность этого процесса анионного и катионного состава природной воды, pH, температуры, плотности тока, скорости потока воды, выбора катодного материала, позволившие определить оптимальные условия электрохимического синтеза коагулянта гидроксида алюминия.

В результате проведенного гидрохимического анализа поверхностных и подземных вод показано, что природные воды заболоченных районов Республики Беларусь маломинерализованы и, согласно классификации природных вод по преобладающему аниону и катиону и соотношению между главными ионами (по О.А. Алекину), относятся к гидрокарбонатному классу, группы кальция, типу I. Общая минерализация природных вод находится в пределах 1,0-4,0 ммоль/дм<sup>3</sup>. Минеральный состав воды представлен в основном гидрокарбонат-, хлорид- и сульфат-ионами и катионами кальция, магния и натрия. Остальные ионы находятся в воде в минимальных количествах и существенного влияния на минерализацию воды не оказывают.

Изучение влияния анионного и катионного состава маломинерализованных природных вод на электрохимическое растворение алюминиевого анода проводили по разработанной методике с применением треугольных диаграмм.

Для исследований готовились солевые составы с основными анионами и катионами с общей минерализацией солей по анионному и катионному составу 1,0; 2,0 и 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup> (рисунки 1,2).

Исследования проводились на экспериментальной электролизной установке, в состав которой входили электрокоагулятор, выпрямитель тока, фильтр, емкости для исходной и очищенной воды.

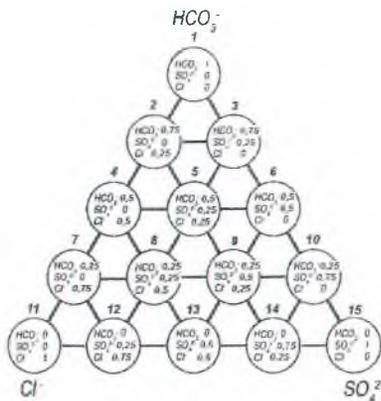


Рисунок 1 – Анионный состав воды при общей минерализации анионов 1,0 ммоль/дм<sup>3</sup>

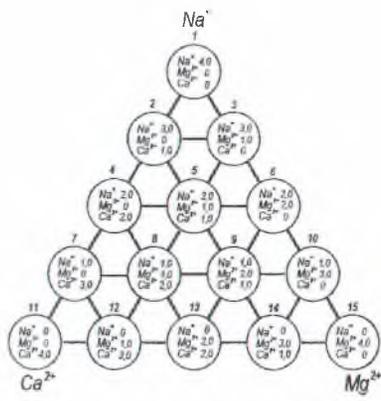


Рисунок 2 – Катионный состав воды при общей минерализации катионов 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup>

Установлено, что на выход по току  $V_T$  процесса анодного растворения алюминия в значительной степени влияет состав и концентрация основных анионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ ) в воде (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние анионного состава воды на выход по току  $V_T$  процесса анодного растворения алюминия

№ состава	Общая минерализация анионов в воде, ммоль/дм <sup>3</sup>								
	1,0			2,0			4,0		
	$V_T$ , %	рН		$V_T$ , %	рН		$V_T$ , %	рН	
		до	после		до	после		до	после
электролиза		электролиза		электролиза		электролиза			
1	31,2	7,3	8,3	25,5	7,5	8,6	15,9	7,7	8,7
2	109,4	7,2	8,1	113,2	7,3	8,4	120,1	7,5	8,55
3	28,7	7,2	8,1	29,1	7,35	8,4	29,4	7,6	8,5
4	111,4	7,0	8,1	115,7	7,2	8,35	123,8	7,5	8,4
5	101,6	7,1	8,3	102,3	7,25	8,4	105,1	7,5	8,4
6	40,5	7,3	8,4	39,8	7,3	8,4	37,1	7,5	8,4
7	115,1	7,1	8,2	119,1	7,0	8,15	125,2	7,3	8,35
8	102,5	7,0	8,1	104,3	7,1	8,2	106,8	7,3	8,3
9	98,9	7,0	8,0	101,1	7,1	8,2	104,2	7,3	8,3
10	45,8	7,1	8,2	46,2	7,1	8,2	46,7	7,35	8,3
11	121,1	6,8	7,6	122,0	7,0	7,7	126,4	7,1	8,25
12	104,3	6,8	7,7	105,6	7,0	7,8	107,3	7,1	8,2
13	101,2	7,0	7,7	103,2	7,0	7,8	106,1	7,1	8,25
14	98,3	6,9	7,7	97,8	7,0	7,8	95,1	7,1	8,2
15	64,1	7,0	7,8	62,8	7,0	7,8	60,0	7,15	8,2

Наибольшие значения выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия проявляются в составе 11 (121,1, 122,0, 126,4 % при общей минерализации анионов в воде 1,0; 2,0 и 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup> соответственно). Хлорид-ионы, выступая как специфические активаторы, повышают химическую активность алюминиевого анода. За счет увеличения в воде количества хлорид-ионов и действия постоянного электрического тока наряду с электрохимическим растворением алюминиевого анода дополнительно происходит его химическое растворение, что подтверждается расчетными значениями выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия (на 21-26 % больше теоретического значения).

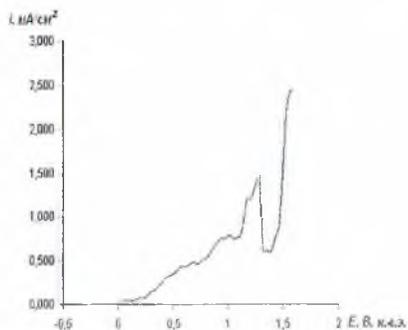
В присутствии гидрокарбонат- и сульфат-ионов скорость анодного растворения алюминия снижается, а выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия имеет более низкие значения (в составе 1 – 15,9-31,2 %, в составе 15 – 60,0-64,1 %). Отрицательное влияние гидрокарбонат-ионов проявляется сильнее, чем сульфат-ионов. В гидрокарбонатных растворах на поверхности анода образуется белый осадок оксида алюминия, пассивирующий поверхность анода и препятствующий его растворению. Активирование анода в гидрокарбонатных растворах и увеличение скорости анодного растворения алюминия происходит при введении в воду незначительных количеств хлорид-ионов. Так, введением в раствор 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> хлорид-ионов (состав 2) выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия резко увеличивается в 3,5-7,5 раз (таблица 1). Сульфат-ионы не только пассивируют поверхность алюминиевого анода, но и снижают активирующее действие хлорид-ионов. Это особенно заметно в составе 14. Поэтому активное растворение алюминиевого анода и повышение выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия до 104,3-107,3 % происходит при одновременном уменьшении содержания сульфат-ионов и увеличении хлорид-ионов в воде (состав 12).

Исследования тройных составов 5, 8 и 9 показали, что с увеличением концентрации хлорид-ионов на 0,25-1,0 ммоль/дм<sup>3</sup> при общей минерализации анионов от 1,0 до 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup> значения выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия более 105 % увеличиваются до 20 %.

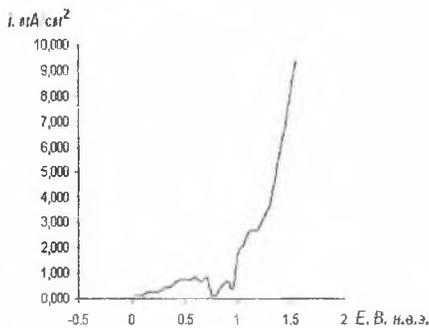
Впервые установлено, что депассивация алюминиевого анода и его активация в маломинерализованных природных водах достигается дополнительным введением в воду хлорид-ионов до концентрации не менее 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> (патент).

Результаты исследований влияния основных катионов воды ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) на процесс электрохимического растворения алюминиевого анода показали, что катионный состав, по сравнению с анионным составом, не оказывает влияния на анодное растворение алюминия.

Для подтверждения активации процесса электрохимического растворения алюминиевого анода хлорид-ионами проведены поляризационные измерения с помощью потенциостатического комплекса в составе потенциостата ПИ 50.1.1 в комплекте с программатором ПР-8. В качестве электрода сравнения использовался хлорсеребряный электрод. Исследования проводились на природной воде без добавления и с добавлением 0,1, 0,2 и 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> хлорид-ионов. Поляризационные кривые представлены на рисунках 3-5.



**Рисунок 3 – Поляризационная кривая алюминиевого электрода в природной воде без добавления хлорид-ионов**



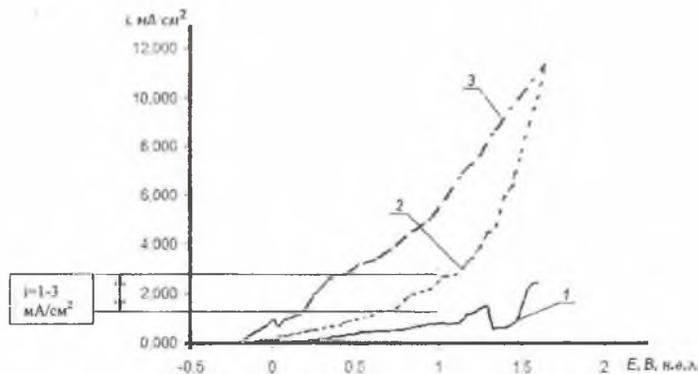
**Рисунок 4 – Поляризационная кривая алюминиевого электрода в природной воде с добавлением 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup> хлорид-ионов**

Как следует из потенциометрических измерений, бестоковый потенциал алюминиевого электрода в природной воде без добавления хлорид-ионов (рисунок 3) имеет достаточно положительное значение по сравнению с потенциалом стандартного алюминиевого электрода. Это подтверждает образование пассивной оксидной пленки на поверхности алюминиевого анода. Сдвиг потенциала в анодную сторону приводит к увеличению скорости анодного процесса, а именно, окислению алюминия и образованию новых активных слоев. В области потенциалов 1,2-1,3 В наблюдается снижение анодного тока, обусловленного образованием на поверхности алюминия оксидной пленки. Дальнейший рост потенциала анода приводит к существенному увеличению скорости анодного процесса за счет выделения кислорода. В данных условиях электролиза перенапряжение выделения кислорода составляет порядка 0,7 В, что связано с особенностью процесса выделения кислорода на алюминиевом аноде и низкой скоростью окисления воды в нейтральных растворах.

Введение в электролит 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup> хлорид-ионов (рисунок 4) приводит к незначительному сдвигу бестокового потенциала алюминиевого элек-

трода в катодную сторону, а с ростом анодного потенциала наблюдается увеличение скорости анодного процесса при 0,5 В в 2 раза. В первую очередь это может быть связано с депассивацией анодной поверхности в результате вытеснения адсорбированного кислорода анионами СГ.

Наиболее существенное влияние на анодное растворение алюминия оказывают хлорид-ионы при концентрации 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> (рисунок 5, кривая 3). Плотность анодного тока при 0,3 В составляет 2,5 мА/см<sup>2</sup>. При более положительных потенциалах наблюдается снижение скорости процесса окисления алюминия и протекание анодного процесса в некоторых диффузионных затруднениях. Поэтому с целью снижения процессов пассивации алюминиевого анода при анодной поляризации, активации электрохимического растворения алюминия и предотвращения выделения кислорода анодный процесс следует проводить при плотности тока 1-4 мА/см<sup>2</sup> и концентрации хлорид-ионов в воде не менее 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup>.



1 – вода без добавления СГ; 2 – с добавлением 0,2; 3 – 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> СГ

**Рисунок 5 – Поляризационные кривые алюминиевого электрода в природной воде с добавлением хлорид-ионов**

Процесс анодного растворения алюминия активируется при низких и высоких значениях рН, что подтверждается увеличением значений выхода по току  $V_T$  процесса анодного растворения алюминия (таблица 2). Так, при снижении рН воды до 3,0 и повышении до 11,0 выход по току  $V_T$  процесса анодного растворения алюминия возрастает на 7,7 и 14,2 % соответственно, что объясняется хорошей растворимостью оксидов алюминия в этих средах и повышает не только электрохимическое, но и химическое растворение алюминиевого анода.

Таблица 2 – Зависимость выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия от pH

$pH_{\text{тех}}$	3,0	3,3	3,7	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
$pH_{\text{опр}}$	4,3	4,6	5,9	6,1	6,5	6,8	8,4	8,7	9,1	9,5	9,8
$B_T^{Al}$ , %	123,2	120,8	118,5	117,9	115,0	114,0	113,8	115,5	117,5	121,3	128,5
$\Delta m_{\text{пр}}^{Al}$ , мг/дм <sup>3</sup>	68,9	67,5	66,2	65,9	64,3	63,7	63,6	64,6	65,7	67,8	72,1

Примечание –  $t_s = 5$  мин.;  $\Delta m_{\text{теор}}^{Al} = 55,9$  мг/дм<sup>3</sup>.

Исследования процесса анодного растворения алюминия при разных температурах воды показали, что активация процесса электрохимического растворения алюминиевого анода значительно усиливается при повышении температуры воды от 5 до 30 °С (при  $i = 2,5$  и  $10,0$  мА/см<sup>2</sup> и 30 °С  $B_T$  составляет 124, 5 и 133 % соответственно), при повышении температуры от 30 до 50 °С процесс активации замедляется (при 50 °С  $B_T$  – 126 и 136 % соответственно), а при температуре выше 50 °С процесс растворения алюминиевого анода тормозится (при 90 °С  $B_T$  – 123 и 130 % соответственно).

При повышении температуры воды на поверхности алюминиевого анода разрушается оксидная пленка, и образуются свободные активные участки, что способствует увеличению скорости дополнительного химического взаимодействия алюминия с водой и его растворения. Интенсифицирует процесс электрохимического растворения алюминия в начальный период электролиза увеличение плотности тока. При высоких температурах процесс растворения алюминиевого анода замедляется вследствие уплотнения между электродами коагулянта гидроксида алюминия.

Установлено, что при длительной продолжительности электролиза (в течение 10-15 суток) для активирования растворения алюминиевого анода присмелемыми параметрами процесса являются температура воды 5-20 °С и плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>. Использование более высоких значений плотности тока и температуры воды значительно снижает выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия. Так, при плотности тока 10,0-15,0 мА/см<sup>2</sup> интенсивное генерирование коагулянта гидроксида алюминия происходит только в течение первых часов процесса электролиза, затем  $B_T$  резко снижается, а напряжение на электродах увеличивается, особенно при температуре воды выше 20 °С (таблица 3).

Использование проточного режима в электрокоагуляторе ( $v_{\text{воды}}$  от 1,5 до 350 м/ч) показало улучшение электрохимического растворения алюминиевого анода при небольших значениях плотности тока. В непроточных условиях затрудняется отвод продуктов электролиза от поверхности анода, а, следова-

тельно, повышается его поляризация. При движении потока воды в межэлектродном пространстве поляризация электродов снижается, понижая напряжение на электродах. Установлено, что для электрокоагуляционных установок малой производительности с целью высокой эффективности генерирования коагулянта гидроксида алюминия рекомендуемой оптимальной скоростью потока воды следует принимать значения 15 и более м/ч.

Таблица 3 – Зависимость выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия (%) от температуры воды  $t$  и плотности тока  $i$  при различной продолжительности электролиза  $t_s$

$i$ , мА/см <sup>2</sup>	1,0			2,5			5,0			10,0		
	$t, ^\circ\text{C}$											
$t_s$	5	20	50	5	20	50	5	20	50	5	20	50
1 ч	110,5	114,6	122,8	115,0	120,0	126,0	120,2	124,5	129,3	122,0	130,2	135,2
6 ч	110,2	114,0	122,5	115,2	120,0	125,5	120,0	124,0	125,0	120,8	130,0	130,5
12 ч	111,2	115,0	122,8	115,3	120,0	125,7	118,0	124,0	122,4	120,5	125,0	98,5
18 ч	111,0	115,0	123,0	115,5	120,1	125,0	119,0	122,5	120,6	120,5	118,6	45,7
1 сут.	110,3	115,0	122,5	155,0	120,4	125,0	118,5	123,0	117,8	121,3	116,5	11,9
2 сут.	110,1	144,0	122,0	115,1	120,0	125,3	117,5	121,4	109,9	112,0	44,6	-
3 сут.	110,0	114,0	122,4	115,0	120,2	125,3	118,5	122,0	88,6	98,5	9,6	-
4 сут.	109,5	114,2	122,0	115,1	120,2	125,0	118,1	120,0	54,3	79,8	-	-
5 сут.	109,4	114,1	122,0	115,1	120,0	125,1	118,0	110,0	21,5	13,3	-	-
10 сут.	109,5	114,3	122,1	115,1	120,0	124,8	117,8	100,5	-	8,6	-	-
15 сут.	109,0	114,0	120,0	115,0	120,0	119,5	103,7	50,0	-	-	-	-

Примечание –  $v_{\text{воды}} = 15,0$  м/ч (0,25 м/мин)

Изучение влияния катодного материала на электрохимическое растворение алюминия показало, что эффективно процесс электролиза протекает в электролизере с катодом из нержавеющей стали 08Х18Н10: растворение анодных пластин происходило равномерно, выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия в течение 30 суток оставался практически постоянным (105-115 %). Резкое снижение выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия и силы тока (уже после 8-часовой непрерывной работы электролизера) было отмечено в опытах с катодным материалом из алюминия А6: сила тока снижалась на 1,2 А, а  $B_T$  – на 78,9 %. В опытах с катодом из легированной стали Ст.3 такое же явление наблюдалось после 24-часовой непрерывной работы электролизера: снижение силы тока на 1,6 А, а  $B_T$  – на 89 %.

В третьей главе экспериментально обоснованы условия электрокоагуляционного процесса (температуры, pH, дозы алюминия, плотности тока, длительности очистки, ионного состава), обеспечивающие улучшение микробиологических, химических и органолептических свойств и показателей качества природной воды.

Согласно требованиям СанПиНа 10-124 РБ 99 питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства.

Установлено, что эффективное обеззараживание природной воды электрокоагуляцией происходит при высоких значениях температуры воды (более 50°C), что объясняется денатурацией белков в живых клетках и их разрушением. Изменение величины pH воды от 3,0 до 11,0 показало, что при pH 3,0 эффективность удаления клеток фитопланктона (*Microcystis aeruginosa*) составляет 91 %, а при pH 11,0 – 73,1 % при исходном содержании 10 000 кл/см<sup>3</sup>.

Показано, что эффективность удаления фитопланктона и бактерий (*Escherichia coli*) зависит от дозы алюминия, что объясняется влиянием на клетки электрического поля и их дальнейшим разрушением. Например, дозой алюминия 5,0 и 10,0 мг/дм<sup>3</sup> электрокоагулированием удаляется до 82 и 100 % клеток фитопланктона и 93,6 и 95 % клеток бактерий соответственно (таблица 4), что подтверждается исследованиями по влиянию на процесс обеззараживания воды плотности тока.

Таблица 4 – Эффективность Э удаления из воды бактерий и фитопланктона электрокоагуляционным методом при различных дозах алюминия  $D^{Al}$

$D^{Al}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{фит}^{исх}$ , кл/см <sup>3</sup>	Э, %	$C_{бикт.}^{осч}$ , ос/дм <sup>3</sup>	Э, %
0,5	7 000	30	11 550	92,3
1,0	5 900	41	11 100	92,6
2,5	3 500	65	10 500	93
5,0	1 800	82	9 600	93,6
7,5	800	92	8 700	94,2
10,0	0	100	7 500	95
20,0	-	-	1 125	99,25
30,0	-	-	225	99,85
40,0	-	-	30	99,98
50,0	-	-	0	100

Примечание –  $C_{фит.}^{исх}$  = 10 000 кл/см<sup>3</sup>;  $C_{бикт.}^{исх}$  = 150 000 ос/дм<sup>3</sup>;  $t$  = 18 °C; pH 7,9-8,2.

Установлено, что при плотности тока более 5,0 мА/см<sup>2</sup> усиливается электрофлотационный процесс, который способствует всплыванию свежееобразованного гидроксида алюминия и соответственно снижению его адсорбционных свойств на поверхности раствора. Применение проточного режима рабо-

ты электрокоагулятора ( $v_{\text{воды}} = 15,0$  м/ч) позволяет восстановить сорбционную активность коагулянта и повысить эффективность удаления бактерий и фитопланктона из воды.

Природные воды заболоченных районов Республики Беларусь, особенно подземные воды, характеризуются высоким содержанием железа.

Установлено, что эффективное снижение содержания железа в воде электрокоагуляцией на 75-77 % происходит при повышении температуры воды до 40-50 °С, на 83-100 % – при pH 7,8-9,0 (при  $D^{A^{Fe}} = 2,5$  мг/дм<sup>3</sup>), что объясняется, с одной стороны, ускорением процесса окисления железа (II) в железо (III) выделяющимся на аноде кислородом, резерв которого увеличивается с повышением pH воды и ее гидратной щелочности, с другой – улучшением условий процесса образования коагулянта Al(OH)<sub>3</sub> с высокими сорбционными свойствами. В щелочной среде поверхность коллоидной частички золя Al(OH)<sub>3</sub> приобретает отрицательный заряд за счет адсорбции потенциалобразующих гидроксильных ионов ( $nOH^-$ ). В качестве противоионов в мицелле выступают ионы железа ( $3(n-x)Fe^{3+}$ ). Так, при дозе алюминия 1,25 мг/дм<sup>3</sup> и pH 6,0 остаточное содержание железа общего составляло 77 %, а при тех же условиях и pH 8,0 и 9,0 – 18 и 2 % соответственно (при  $C_{\text{алюм}}^{\text{нec}} = 10,0$  мг/дм<sup>3</sup>).

Показано, что небольшими дозами алюминия можно снизить содержание железа в воде до нормативных значений. Так, при дозе алюминия 1,25 мг/дм<sup>3</sup> (pH 7,5) остаточная концентрация железа в воде составляет 65 % (снижается в 1,5 раза) и уменьшается до 12 % (снижается в 8,3 раза) при дозе алюминия 2,5 мг/дм<sup>3</sup>. С увеличением плотности тока возрастает расход электроэнергии. Так, при плотности тока 0,1 и 2,5 мА/см<sup>2</sup> и дозе алюминия 5,0 мг/дм<sup>3</sup> остаточная концентрация железа в воде составляет 39 %, а расход электроэнергии при этом возрастает с 0,016 до 0,11 кВт·ч/м<sup>3</sup> за счет увеличения напряжения на электродах от 1,0 до 5,0 В. Поэтому обезжелезивание воды следует проводить при плотности тока до 2,5 мА/см<sup>2</sup>.

Обезжелезивание воды улучшается с увеличением содержания взвешенных веществ, что объясняется дополнительной сорбционной способностью глинистых частиц и почвенных взвесей, которые интенсифицируют процесс коагуляции гидроксида алюминия, способствуя образованию более крупных и прочных хлопьев.

Установлено, что на эффективность снижения железа в воде не оказывает влияние проточный режим в электрокоагуляторе.

Электрокоагуляцией достигается эффективное снижение перманганатной окисляемости до нормативных значений при небольших расходах электродного материала и электроэнергии. Наиболее приемлемыми параметрами процесса являются pH 7,5-8,0, температура воды 40-60 °С и плотность тока 1,0-2,5 мА/см<sup>2</sup>.

При подготовке воды для теплоэнергетических целей из нее необходимо удалять кремний, который участвует в образовании сложных силикатных накипей с низким коэффициентом теплопроводности, и растворенный кислород, проявляющий агрессивные коррозионные свойства.

Механизм удаления соединений кремния из воды основан на взаимной коагуляции противоположно заряженных коллоидов, в результате которой происходит адсорбция одного коллоида поверхностью другого.

Установлено, что соединения кремния эффективно удаляются при температуре воды 30-60 °С, рН 6,0-8,5. При рН<6,0 и рН>8,5 образующийся гидроксид алюминия подвергается растворению, что приводит к снижению его адсорбционной способности и, соответственно, ухудшает эффективность обескремнивания.

Увеличение плотности тока от 1,0 до 10 мА/см<sup>2</sup> снижает эффективность удаления соединений кремния из воды. Так, при плотности тока 1,0 мА/см<sup>2</sup>, дозе алюминия 10,0 мг/дм<sup>3</sup> концентрация кремния (по SiO<sub>2</sub>) снижается с 14,2 до 2,8 мг/дм<sup>3</sup>, а при плотности тока 5,0 и 10,0 мА/см<sup>2</sup> – до 3,2 и 4,6 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Поэтому, оптимальной величиной плотности тока следует считать 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>, а использование высоких величин нецелесообразно.

Результаты влияния основных анионов воды (НСО<sub>3</sub><sup>-</sup>, Сl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) на эффективность удаления кремния показали, что наибольшая эффективность обескремнивания, составляющая 86,8-95,2 % при минерализации анионов 1-4 мг/дм<sup>3</sup>, лежит в области исследованных составов 2, 4, 5, 7, 8, 11, 12 (рисунок 1), т.е. в присутствии хлорид-ионов. В гидрокарбонатно-сульфатных растворах эффективность обескремнивания снижается и достигает 65,1-68,9 % (состав 3). В сульфатно-хлоридных растворах с увеличением доли сульфатов свыше 25 % эффективность удаления кремния составляет 63,8-79,1 %. Сульфат-ионы сорбируются на хлопьях коагулянта гидроксида алюминия, снижая его сорбционную емкость по отношению к соединениям кремния. Обнаружено, что повышение концентрации Сl<sup>-</sup>-ионов в воде при увеличении общей минерализации анионов (до 4 мг/дм<sup>3</sup>) снижает коагуляционные свойства коллоида гидроксида алюминия по отношению к соединениям кремния и, соответственно, эффективность обескремнивания с 94,0 до 87,7 % (состав 11).

Увеличение доли ионов кальция от общей минерализации катионов в воде повышает эффективность очистки до 100 % (рисунок 2, составы 4, 7, 11). Присутствие в воде ионов магния несколько тормозит процесс обескремнивания. Особенно этот процесс заметен при увеличении их концентрации в растворе более 0,5-0,75 ммоль/дм<sup>3</sup> от общей минерализации катионов – процент удаления соединений кремния при этом снижается до 79,8-92,3 %.

Проточный режим в электрокоагуляторе незначительно повышает эффективность удаления из воды соединений кремния. Так, при увеличении скорости

движения воды от 1,0 до 15 м/ч, при одной и той же дозе алюминия остаточная концентрация кремния (по  $\text{SiO}_2$ ) изменялась на 2,7-4 %.

Удаление растворенного в воде кислорода основано на его катодном восстановлении и окислении веществ, выделяющихся при анодном растворении металла.

Установлено, что с увеличением температуры воды эффективность удаления кислорода резко возрастает, а при повышении pH остаточная концентрация кислорода в воде увеличивается незначительно. При увеличении pH и температуре исходной воды 40°C и выше эффект обескислороживания остается почти постоянным. Незначительное улучшение процесса обескислороживания при низких значениях pH объясняется влиянием водородной деполаризации. Интенсивное выделение пузырьков водорода способствует перемешиванию воды и уменьшению толщины диффузионного слоя в прикатодной зоне. Приемлемой величиной плотности тока следует считать 0,5-2,5 мА/см<sup>2</sup>, дозы алюминия – 2,5-10,0 мг/дм<sup>3</sup>. Проточный режим в электрокоагуляторе приводит к ухудшению процесса обескислороживания, так как не обеспечивается эффективный подвод растворенного кислорода к электродам и время пребывания воды в электролизере.

Установлено, что оптимальными условиями для удаления из природной воды гумусовых веществ, обуславливающих ее цветность, являются температура воды 20-50 °С, pH 4,0-8,0, плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup> и доза алюминия 3,0-4,0 мг/дм<sup>3</sup>. Удаление высокодисперсных частиц мутности электрокоагуляцией эффективно при температуре воды 40-60 °С, pH 4,5-6,5, плотности тока 0,1-10,0 мА/см<sup>2</sup> и дозе алюминия 0,5-3,0 мг/дм<sup>3</sup>.

**В четвертой главе** представлена разработанная технология электрокоагуляционной очистки природных вод с активацией анодного растворения алюминия путем введения в электролизер раствора NaCl.

На основании установленных оптимальных условий процесса электрокоагуляции и рекомендуемой схемы водоподготовки с применением электрокоагуляционного метода успешно проведены испытания разработанной технологии на водозаборах № 3, 4 КУ ПВКХ «Водоканал» г. Бреста, которые показали, что небольшими расходами генерированного коагулянта гидроксида алюминия можно эффективно удалять из воды загрязнения до нормативных показателей СанПиН 10-124 РБ 99.

Приведена методика технологического и конструктивного расчета электрокоагулятора, учитывающая расчет требуемой степени вентиляции производственного помещения.

**В пятой главе** показана эффективность применения разработанной технологии электрокоагуляционной очистки природной воды по сравнению с реагентной очисткой, что следует из технико-экономического сравнения затрат и себестоимости обработки 1 м<sup>3</sup> воды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Изучен процесс электрохимического растворения алюминия в маломинерализованных водах. Выявлены условия, обеспечивающие наибольший выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия, к которым относятся: температура воды 5-20 °С, pH 8,0-9,0, плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>, катодный материал из нержавеющей стали 08Х18Н10, скорость потока воды 15,0 и более м/ч. Установлено, что электрохимическое окисление алюминия способствует протеканию процесса химического растворения, поэтому расчетные значения выхода по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия в ряде случаев превышают 100 % на 1,6-26,4 % [1-А].

2. Определено влияние анионного и катионного состава электролита на эффективность анодного растворения алюминия. Установлено, что в присутствии анионов  $SO_4^{2-}$  и  $HCO_3^{2-}$  скорость анодного растворения алюминия и выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия снижаются, причем отрицательное влияние гидрокарбонат-ионов сказывается сильнее, чем сульфат-ионов. Так, в 100 %-гидрокарбонатных растворах при концентрациях  $HCO_3^{2-}$ -ионов 1,0, 2,0 и 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup> выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия составляет соответственно 31,2, 25,5 и 15,9 %. В 100 %-сульфатных растворах выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия снижается до 64,1, 62,8 и 60 % соответственно. Установлено, что введение в электролит анионов  $Cl^-$  позволяет интенсифицировать не только электрохимическое, но и химическое растворение алюминия, обеспечивает эффективную депассивацию анода, что подтверждено данными потенциостатических измерений. Так, в 100 %-хлоридных растворах при концентрациях анионов  $Cl^-$  1,0, 2,0 и 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup> выход по току  $B_T$  процесса анодного растворения алюминия составляет соответственно 121,1, 122,0 и 126,4 %. Поэтому для эффективного протекания анодного процесса растворения алюминия и из-за недостаточной концентрации хлорид-ионов в природной воде необходимо увеличение количества анионов  $Cl^-$  до 0,25 ммоль/дм<sup>3</sup> от общего анионного состава природной воды [2-А].

Приоритет разработанного способа депассивации алюминиевых электродов, включающий дополнительное введение в маломинерализованную природную воду хлорид-ионов и обеспечивающий длительную работу электролизера, защищен патентом на изобретение [12-А].

3. Впервые проведено комплексное систематическое исследование условий электрокоагуляционной очистки природной воды в объемном пространстве электролизера, обеспечивающих улучшение органолептических,

химических и микробиологических свойств и показателей качества. Определено, что в процессе электрохимического анодного окисления алюминия в маломинерализованной воде генерируется гидроксид алюминия, характеризующийся высокой сорбционной способностью. Найдено, что эффективность очистки воды от примесей повышается за счет электрофлотационного процесса, протекание которого обеспечивается выделением кислорода на аноде и водорода не только на катоде, но и на аноде (в результате реакции химического растворения алюминия).

Выявлены и предложены оптимальные условия снижения (до нормативных значений СанПиН 10-124 РБ 99): цветности – температура воды 20-50 °С, рН 4,0-8,0, плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 3,0-4,0 мг/дм<sup>3</sup>; мутности – температура воды 40-60 °С, рН 4,5-6,5, плотность тока 1,0-10,0 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 0,5-3,0 мг/дм<sup>3</sup>; содержания железа – температура воды 40-50 °С, рН 8,0, плотность тока 1,0-2,5 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 1,25-2,5 мг/дм<sup>3</sup>; соединенный кремния – температура воды 30-60 °С; рН 6,0-8,5; плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 2,5-5,0 мг/дм<sup>3</sup>; кислорода – температура воды 40-60 °С, рН>7,5, плотность тока 0,5-2,5 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 2,5-10,0 мг/дм<sup>3</sup>; перманганатной окисляемости – температура воды 40-60 °С; рН 7,5-8,0; плотность тока 1,0-2,5 мА/см<sup>2</sup>; фитопланктона – температура воды более 50°С, рН 7,9-8,2, плотность тока 1,0-5,0 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 0,1-5,0 мг/дм<sup>3</sup>; микроорганизмов – температура воды более 50°С, рН 3,0-4,5 и 9,5-11,0, плотность тока 2,5 мА/см<sup>2</sup>, доза алюминия 10,0 мг/дм<sup>3</sup> при проточном режиме работы электрокоагулятора (скорость потока воды 15 м/ч) [3-А, 4-А, 5-А, 7-А, 8-А, 9-А, 10-А, 11-А].

Анализ полученных результатов позволил выявить оптимальные условия для комплексного удаления загрязнений из маломинерализованных природных вод: температура воды 20-60°С, рН 6,5-8,5, доза алюминия 1,0-5,0 мг/дм<sup>3</sup> (для улучшения органолептических свойств) и 2,5-10,0 мг/дм<sup>3</sup> (для улучшения химических и микробиологических показателей), плотность тока 1,5-5,0 мА/см<sup>2</sup>, скорость потока воды 15 м/ч.

4. Разработана технология электрокоагуляционной очистки природных маломинерализованных вод, которая сочетает процессы активирования анодного растворения алюминия в присутствии хлорид-ионов, его депассивацию, электрокоагуляционную и электрофлотационную очистку воды от минеральных, органических и микробиологических загрязнений. Проведены испытания разработанного метода, технологии и установки электрокоагуляционной очистки поверхностной и подземной воды в производственных условиях на водозаборах № 3, 4 КУПВКХ «Водоканал» г. Бреста [6-А].

Показана эффективность применения разработанной технологии электрокоагуляционной очистки маломинерализованных природных вод по сравнению с реагентной очисткой алюминиевым коагулянтом технико-экономическим сравнением вариантов по приведенным затратам и себестоимости обработки 1 м<sup>3</sup> воды.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. На примере апробации разработанной технологии электрокоагуляционной очистки природных вод на водозаборах № 3, 4 КУ ПВКХ «Водоканал» г. Бреста показана перспективность ее широкого внедрения на установках малой производительности от 0,5 до 10,0 м<sup>3</sup>/ч.

2. Разработанная технология электрокоагуляционной очистки природных вод внедрена в учебный процесс в лабораторный практикум по дисциплинам «Водоподготовка», «Отраслевая экология», «Основы экологии» для студентов специальности 1-70 04 03 (акт внедрения).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

- 1-А Яловая, Н.П. Перспективы электрокоагуляционной технологии очистки природных вод для небольших автономных объектов / Н.П. Яловая // Вестник БрГТУ. – 2006. – № 2(38): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 70–73.
- 2-А Яловая, Н.П. Экологический мониторинг качества воды р. Мухавец / Н.П. Яловая, П.П. Строкач, Ю.С. Яловая // Вестник БрГТУ. – 2004. – № 2(26): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 60–61.
- 3-А Яловая, Н.П. Исследование электрохимического удаления загрязнений из поверхностных вод / Н.П. Яловая, П.П. Строкач // Вестник БрГТУ. – 2004. – № 2(26): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 57–60.
- 4-А Яловая, Н.П. Исследование процесса электрохимического обескремнивания поверхностных вод / Н.П. Яловая // Вестник БрГТУ. – 2003. – № 5(23): Физика, математика, химия. – С. 91–94.
- 5-А Яловая, Н.П. Исследование влияния физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс обескислороживания поверхностных вод / Н.П. Яловая, П.П. Строкач // Вестник БрГТУ. – 2003. – № 5(23): Физика, математика, химия. – С. 94–96.
- 6-А Яловая, Н.П. Разработка и испытание электрокоагуляционной технологии очистки маломинерализованных природных вод / Н.П. Яловая // Вестник БрГТУ. – 2007. – № 2(44): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 98–103.
- 7-А Яловая, Н.П. Улучшение микробиологических показателей природной воды электрокоагуляцией / Н.П. Яловая // Вестник БрГТУ. – 2008. – № 2(50): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 37–40.

### Статьи в сборниках материалов конференций

- 8-А Яловая, Н.П. Исследование влияния активной реакции среды, температуры и плотности тока на процесс электрохимического обезжелезивания воды / Н.П. Яловая, П.П. Строкач, Ю.В. Стефаненко // Материалы науч.-техн. конф., посвящ. 30-летию ин-та, Брест, апрель 1996 г. / БПИ; редкол.: Строкач П.П. [и др.]. – Брест, 1996. – С. 255–256.

- 9-А Яловая, Н.П. Исследование обезжелезивания природных вод электрокоагуляционным методом / Н.П. Яловая // Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества: материалы VIII междунар. науч. конф., Витебск, 19–20 мая 2005 г.: в 2 ч. / редкол.: В.А. Ключников [и др.]. – Минск, 2005. – Ч. 1. – С. 249–251.
- 10-А Яловая, Н.П. Исследование влияния физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс электрокоагуляционного обезжелезивания природных вод / Н.П. Яловая, П.П. Строкач // Сахаровские чтения 2005 года: экологические проблемы XXI века: материалы 5-ой междунар. науч. конф., Минск, 20–21 мая 2005 г.: в 2 ч. / НАН Беларуси, МГЭУ им. А.Д. Сахарова; редкол.: С.П. Кундас [и др.]. – Гомель: РНИУП «Ин-т радиологии». – Минск, 2005. – Ч. 2. – С. 162–163.

#### Тезисы докладов

- 11-А Яловая, Н.П. Исследование электрохимического обезжелезивания подземных вод / П.П. Строкач, Н.П. Яловая // Наука и мир: тезисы XXI науч.-техн. конф., Брест, апрель 1994 г.: в 4 ч. / БПИ. – Брест, 1994. – Ч. 1. – С. 91–92.

#### Патент

- 12-А Способ депассивации алюминиевых электродов при электрохимической очистке природной воды: пат. 12002 Респ. Беларусь, С О2F 1/463 / Н.П. Яловая, П.П. Строкач; заявитель Брестск. гос. технич. ун-т – № а 20080214; заявл. 20.02.08.



## РЭЗЮМЭ

Ялавая Наталля Пятроўна

### Электракаагуляцыйная ачыстка прыродных вод забалочаных раёнаў Рэспублікі Беларусь

*Ключавыя словы:* электракаагуляцыя, каагулянт, сорбцыя, трыягулярная дыяграма, мінеральны састаў, раствор, электралізёр, частата току, аноднае растварэнне, дэпасівацыя, электрагенерацыя.

Мэта работы – вывучэнне фізіка-хімічных асаблівасцей электракаагуляцыйнай ачысткі маламінералізаваных прыродных вод і распрацоўка тэхналогіі электракаагуляцыйнай ачысткі вады крыніц водозабяспячэння забалочаных раёнаў Рэспублікі Беларусь.

Электракаагуляцыйная ачыстка прыродных вод высокаэфектыўна, экалагічна, можа ажыццяўляцца ў кампактных устаноўках і дазваляе ачышчаць прыродную ваду ад мінеральных, арганічных і біялагічных забруджванняў. Аднак адсутнасць сістэматычных даследаванняў электракаагуляцыйнага працэсу і узнікаючая пры гэтым пасівацыя электродаў не дазвалялі забяспечваць доўгую працу электралізэраў.

У рабоце прадстаўлены эксперыментальныя даныя па аноднаму растварэнню алюмінію і ўплыву на эфектыўнасць гэтага працэсу фізіка-хімічных і электрахімічных фактараў, што дазволілі стабільна атрымаць каагулянт гідраксід алюмінію з высокай сарбцыйнай здольнасцю да забруджванняў прыроднай вады.

Распрацаваны спосаб дэпасівацыі алюмініевага анода, які ўключае дадатковае ўвядзенне ў маламінералізаваную прыродную ваду хларыд-іонаў (да  $0,25 \text{ ммоль/дм}^3$ ) і забяспечвае доўгую працу электралізэра.

Прадстаўлена распрацаваная тэхналогія электракаагуляцыйнай ачысткі прыродных вод з актывацыяй аноднага растварэння алюмінію шляхам увядзення ў электралізёр раствору NaCl, якая ўкаранена ў вучэбны працэс у лабараторны практыкум па экалагічным дысцыплінам і рэкамендавана да ўкаранення на прадпрыемствах водападрыхтоўкі.

## РЕЗЮМЕ

Яловая Наталья Петровна

### Электрокоагуляционная очистка природных вод заболоченных районов Республики Беларусь

*Ключевые слова:* электрокоагуляция, коагулянт, сорбция, триангулярная диаграмма, минеральный состав, электролизер, плотность тока, анодное растворение, депассивация, электрогенерация.

Цель работы – изучение физико-химических особенностей электрокоагуляционной очистки маломинерализованных природных вод и разработка технологии электрокоагуляционной очистки воды источников водоснабжения заболоченных районов Республики Беларусь.

Электрокоагуляционная очистка природных вод высокоэффективна, экологична, может осуществляться в компактных установках и позволяет очищать природную воду от минеральных, органических и биологических загрязнений. Однако отсутствие систематических исследований электрокоагуляционного процесса и возникающая при этом пассивация электродов не позволяли обеспечивать длительную работу электролизеров.

В работе представлены экспериментальные данные по анодному растворению алюминия и влиянию на эффективность этого процесса физико-химических и электрохимических факторов, позволившие стабильно получать коагулянт гидроксид алюминия с высокой сорбционной способностью ко многим загрязнениям природной воды.

Разработан способ депассивации алюминиевого анода, который включает дополнительное введение в маломинерализованную природную воду хлорид-ионов (до  $0,25 \text{ ммоль/дм}^3$ ) и обеспечивает длительную работу электролизера.

Представлена разработанная технология электрокоагуляционной очистки природных вод с активацией анодного растворения алюминия путем введения в электролизер раствора NaCl, которая внедрена в учебный процесс в лабораторный практикум по экологическим дисциплинам и рекомендована для внедрения на предприятиях водоподготовки.

## SUMMARY

Natalia Petrovna Yalovaya

### **Electrocoagulation Purification of Natural Waters of Marsh-ridden Areas of the Republic of Belarus**

*Key words:* electrocoagulation, coagulant, sorption, triangular diagram, mineral content, electrolyzer, current density, anodic dissolution, depassivation, electro generation.

The purpose of the research is to investigate physicochemical characteristics of electrocoagulation for purification of natural water and develop electrocoagulation method for water purification in marsh-ridden areas of Belarus.

Electrocoagulation of natural waters is a highly effective and ecology-friendly process. The method can be applied to remove organic, inorganic and microbiological impurities using small compact treatment plants. But the lack of sufficient research of electrocoagulation process that caused electrode passivation failed to insure stable operation of electrolyzers.

This work presents new experimental data on anodic dissolution of aluminium and the influence of physicochemical and electrochemical factors on stable generation of coagulant from aluminum hydroxide with high sorption ability towards many water pollutants.

A depassivation method by addition of chloride ions (up to 0,25 millimole/dm<sup>3</sup>) into low mineralized water to insure the stable operation of electrolyzer has been developed

The developed technology of electrocoagulation for natural water purification by activating anodic dissolution with NaCl solution has been introduced to the teaching process as a practical work on ecology disciplines. The technology has also been recommended for application at water treatment plans.

**Научное издание**

**Яловая Наталья Петровна**

**ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА ПРИРОДНЫХ ВОД  
ЗАБОЛОЧЕННЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальностям

05.17.01 – технология неорганических веществ,

05.17.03 – технология электрохимических процессов и защита от коррозии

---

Подписано к печати 23.04.2009. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 490.

Отпечатано на ризографе Учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г.Брест, ул.Московская, 267

Лицензия ЛП № 02330/0148711 от 30.04.2004.