

На правах рукописи

**ЗАВЬЯЛОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОЙ  
ДООЧИСТКИ ПИТЬЕВЫХ ВОД**

25.00.36 - "Геоэкология" /технические науки/



**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень, 2004

Работа выполнена в Тюменском государственном  
нефтегазовом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Шангарин Владислав Дмитриевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Смирнов Олег Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент  
**Кертман Сергей Витальевич**

Ведущее предприятие: **ОАО «Нефтегазпроект»**

Защита диссертации состоится « 6 » февраля 2004 г. в « 14 » часов  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при Тюменском  
государственном нефтегазовом университете по адресу: **625000**,  
г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского  
государственного нефтегазового университета: 625039, г. Тюмень,  
ул. Мельникайте, 72.

Автореферат разослан « 6 » января 2004 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



С. И. Челомбитко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Проблема обеспечения населения России питьевой водой нормативного качества и в достаточном количестве стала одной из главных и определяющих успешное проведение экономических реформ и усиление их социальной направленности.

В настоящее время установлена ведущая роль водного фактора в возникновении различных кишечных инфекций, поэтому водоснабжение является не только гигиенической, но и важной эпидемиологической проблемой. Особые трудности возникают при обеспечении водой небольших коллективов, когда строительство крупных водопроводных станций нецелесообразно. В этих случаях более перспективными и наиболее выгодными следует считать безреагентные методы обработки воды, не требующие доставки реагентов, устройств и емкостей для их хранения и приготовления, а также капитальных очистных сооружений и больших производственных площадей. К таким методам, в частности, относится электрохимическая коагуляция, которая позволяет улучшить с экологической точки зрения характеристики в широком диапазоне концентраций дисперсной фазы жидких систем.

Электрообработка является одним из экологически чистых методов концентрирования дисперсной фазы, эффективность которой зависит как от параметров электрического поля, так и от физико-химических свойств обрабатываемой дисперсии. Эти свойства весьма разнообразны, и ими можно управлять.

Из сказанного следует, что в основе электрообработки лежат сложные физические и химические явления, познание которых еще далеко от завершения.

С аналогичной проблемой качества обеспечения питьевой водой сталкиваются многие страны мирового сообщества, при этом в индустриально развитых государствах это приобрело



социальный характер. Внимание к проблеме вододефицита во всем мире повышается, и это нашло отражение в том, что ООН объявила 2003 год «годом пресной воды». Поэтому необходимость внедрения эффективных экологически чистых и энергосберегающих технологий очистки питьевой воды (например, использование электрического поля) является наиболее актуальным на сегодняшний день.

Цель работы. Совершенствование метода электрокоагуляционной доочистки водопроводной воды и обоснование определения критерия достаточности (оптимизации) параметров постоянного электрического поля в этом процессе.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовались электрокинетические и электрохимические явления в процессах электрокоагуляционной доочистки водопроводной питьевой воды;

- установление математических зависимостей изменения удельной электропроводности и равновесного водородного потенциала воды, обработанной в постоянном электрическом поле, от напряженности этого поля;

- установление температурных зависимостей изменения удельной электропроводности и равновесного водородного потенциала воды, обработанной в постоянном электрическом поле;

- установление математических зависимостей по оптимизации напряженности постоянного электрического поля в исследованных процессах;

- исследовались релаксационные изменения свойств обработанной в электрическом поле воды;

- разработка методики определения критерия достаточности (оптимизации) процесса электрокоагуляционной доочистки питьевой воды в зависимости от напряженности постоянного электрического поля в границах безопасного напряжения на электродах.

#### **Научная новизна работы:**

- установлено, что в области исследованных температур в качестве критерия достаточности (оптимизации) процесса электрокоагуляционной полноты очистки питьевой воды возможно использование стабилизации изменений ее удельной электрической проводимости и равновесного водородного потенциала;

- установлены математические зависимости удельной электропроводности и равновесного водородного потенциала воды, обработанной в постоянном электрическом поле, от напряженности этого поля;

- установлены температурные зависимости изменения удельной электропроводности и равновесного водородного потенциала воды, обработанной в постоянном электрическом поле;

- предложены математические зависимости по оптимизации напряженности постоянного электрического поля в исследованных процессах;

- установлено, что степень стабилизации изменения свойств обработанной в электрическом поле воды может быть определена по исследованию времени релаксации в течение нескольких суток.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

- Предложена технология очистки водопроводной воды с использованием электрообработки при изменении разности потенциалов на коагуляторе в границах безопасного напряжения на электродах.

- Предложены оптимальные параметры электрообработки воды при ее доочистке в локальных системах.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на:

- 7-ой Международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-7-2001)" (Томск, 2001);
- 7-ом Международном научном симпозиуме им. академика М. А. Усова (Томск, 2003);
- Международной научно-технической конференции "Нефть и газ Западной Сибири", посвященной 40-летию ТюмГНГУ (Тюмень, 2003).

**Рекомендации** по использованию результатов работы. По результатам работы предложены оптимальные режимы электрокоагуляции, практическое применение которых на водоочистительной установке "Водолей-50", позволило снизить себестоимость очистки воды на 20 %.

Основные положения работы используются в лабораторном практикуме и в лекционном курсе по экологии для студентов Тюменского государственного нефтегазового университета.

На защиту выносятся следующие положения:

- использование методов исследования электрокинетических и электрохимических явлений, как инструмента для описания электрокоагуляционных процессов доочистки водопроводной воды, развивающихся при воздействии электрического поля;

использование в качестве критерия достаточности (оптимизации) процесса электрокоагуляционной полноты очистки питьевой воды стабилизацию изменений ее удельной электрической проводимости и равновесного водородного потенциала;

- использование сочетания исследований по сопоставлению электрокинетических и электрохимических явлений, развивающихся в воде при ее обработке в постоянном электрическом поле, для принятия решения об успешности прохождения процесса электрокоагуляционной доочистки воды и оптимизации величины напряженности поля в пределах (40 - 45) В/см в границах безопасной разности потенциалов на электродах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь тезисов докладов и две статьи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и приложения. Работа содержит 135 стр. машинописного текста, 16 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 79 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность за внимание, поддержку и настойчивость при подготовке диссертационной работы научному руководителю д.т.н., профессору Шантарину В. Д., своей семье за терпение и веру в успех, сотрудникам за доброжелательность, всем друзьям за бескорыстную и своевременную помощь, а также многочисленным коллегам из производственных организаций, взявшим на себя нелегкий труд по внедрению технических решений работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов; приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по физике и химии воды, описывающие строение молекул воды и их ассоциацию. Рассмотрены модели структуры, основные

характеристики и параметры физических свойств воды и ее реакции с различными веществами.

Для объяснения свойств воды, были выдвинуты несколько структурных моделей, среди которых наиболее распространены: кластерные (Ж. Немети, Н. Шерага, Н. Франк и У. Вен), клатратные (О. Я. Самойлов) и континуальные (непрерывные) (И. Попл). Рентгенографические исследования воды, проведенные Д. Берналом и Р. Фаулером, подтвердили структурные формирования в жидкой воде.

Выяснению вопросов, связанных с соответствием представляемых моделей экспериментальным данным свойств воды, посвящено значительное количество работ. К сожалению, ни одна из моделей не в состоянии объяснить всю совокупность свойств воды.

Проведенный в работах Смирнова О. В., Воробьевой С. В. и Шантарина В. Д. анализ возможности осуществления достаточно экологичных, экономичных электрохимических способов водоподготовки и водоочистки основывается на теоретических данных возникновения, образования и времени существования новых структур, кинетическая и агрегативная устойчивость которых и будет определять тот предел, до которого необходимо повышать напряженность электрического поля.

Общим для методов электрообработки является использование внешнего электрического поля. Сами методы классифицируются в зависимости от явлений, происходящих в межэлектродном пространстве. Во внимание принимается технология электрообработки, особенности внешнего электрического поля.

Приведены основные теоретические положения, описывающие механизм очистки воды коагулянтами, физическая теория устойчивости и коагуляции.

**Во второй главе** описана установка и методы исследования физико-химических параметров воды.

Эксперименты проводились с использованием электрокоагулятора установки «Водолей - 50», предназначенной для доочистки водопроводной питьевой воды от примесей при повторном её загрязнении во время движения по водопроводным трубам.

В отличие от технологии сорбционной очистки «Водолей - 50», использующий внешнее электрическое поле, не накапливает в себе загрязнения, сохраняет солевой состав воды, удаляя только вредные примеси, обеспечивая при этом получение высококачественной питьевой воды в течение всего срока эксплуатации, придает обрабатываемой воде полезные для здоровья свойства.

Приведены методика измерения удельной электропроводности ( $\gamma$ ) и равновесного водородного потенциала ( $\Delta\phi$ ).

**В третьей главе** описываются электрокинетические явления в процессах электрокоагуляционной доочистки питьевой воды.

С электрокинетическими явлениями, устойчивостью и коагуляцией в дисперсных системах тесно связана электропроводность, которая складывается из электропроводности всех ионов, присутствующих в растворе, и электропроводности дисперсионной среды. Поэтому в работе проведены исследования по изучению процессов изменения электропроводности водопроводной воды, прошедшей предварительную электрообработку в установке «Водолей-50» в постоянном электрическом поле напряженностью от 30 до 60 В/см.

Измерения удельной электрической проводимости проводили с помощью кондуктометра типа КЭЛ-1М2 с использованием электродов из платиновой проволоки по стандартной методике с соответствующей калибровкой.

Уточнение и контроль значений электропроводности проводился на резистивиметре ПР-1 с 4-х электродной схемой по известной методике.

Экспериментальные данные приведены на рис.1.

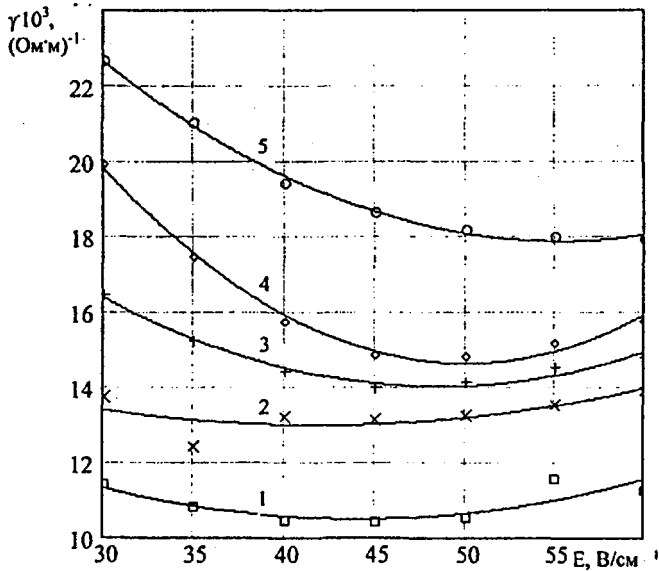


Рис.1. Зависимость удельной проводимости воды от напряженности электрического поля для различных значений температуры:  
1 -  $T = 17^{\circ}\text{C}$ , 2 -  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , 3 -  $T = 23^{\circ}\text{C}$ , 4 -  $T = 26^{\circ}\text{C}$ , 5 -  $T = 29^{\circ}\text{C}$

С увеличением напряженности электрического поля, при котором осуществлялся процесс электрокоагуляции исходной воды, удельная проводимость исследуемой воды резко снижается. Это подтверждает, что процесс осуществленной доочистки водопроводной воды прошел достаточно успешно.

Зависимость  $\gamma = f(E)$  описывается уравнением полиномы

$$\gamma = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 \quad (1)$$

с достаточно высоким коэффициентом детерминации (расчет погрешности выполнен в программе «Mathcad 2000», см. табл.1).

Для всех температурных зависимостей снижение  $\gamma$  четко прослеживается до (40-45) В/см. Этот режим является оптимальным для обработки исходной воды.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения полинома функции  $\gamma=f(E)$  для различных значений температуры

Температура, °С	Коэффициенты уравнения полинома			Коэффициент детерминации
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	
17	18.561	-0.366	$4.15 \cdot 10^{-3}$	0.880
20	18.103	-0.245	$2.93 \cdot 10^{-3}$	0.904
23	30.253	-0.670	$6.90 \cdot 10^{-3}$	0.975
26	46.962	-1.294	$13.0 \cdot 10^{-3}$	0.992
29	40.780	-0.83	$7.51 \cdot 10^{-3}$	0.996

Исследование функции  $\gamma(E)$  для различных температур на экстремум ( $\frac{\partial \gamma}{\partial E} = 0$ ) показало линейную зависимость, выражающуюся уравнением:

$$E = c \cdot T + b \quad (2)$$

( $c = 1,016$ ,  $b = 24,558$ ), т. е. напряженность электрического поля, соответствующего минимальной удельной проводимости для данной температуры может быть определена по данному уравнению. Это дает возможность использовать это отношение, как критерий оптимизации электрического поля при различных температурах (см. рис. 2).

Для оценки эффективности проходящих процессов электрокоагуляции особо обращалось внимание на проведение химических анализов исходной (водопроводной) и прошедшей очистку воды при различных параметрах электрического поля (анализ проводился по 50 параметрам: наличие ионов, аммиака, нитратов и нитритов и т.д.).

Имеющаяся технология очистки вод поверхностных источников водоснабжения, основанная на традиционных методах коагулирования сульфатом алюминия, оказывается недостаточно эффективной и, кроме

того, приводит к повышению содержания в очищенной воде остаточного алюминия ( $Al^{+3}$ ).

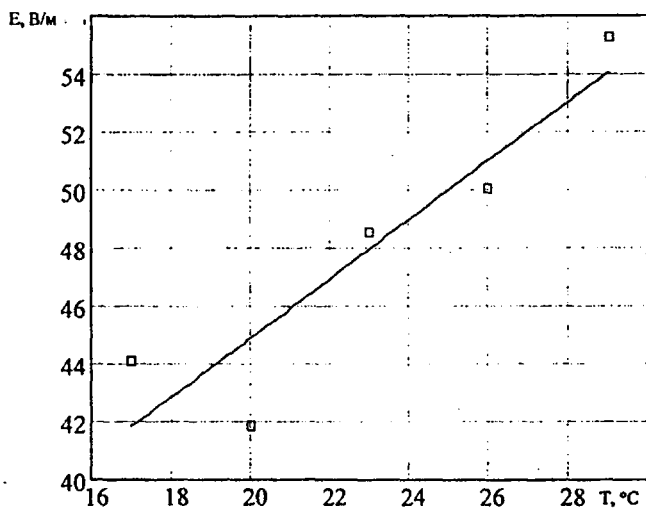


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля, соответствующей минимальной удельной проводимости воды, от температуры.

Концентрация остаточного алюминия ( $Al^{+3}$ ) отнесена к санитарно-токсикологическим показателям вредности и при уровне жесткости (8,0 - 6,3) мг-экв/дм<sup>3</sup> ее безвредное значение колеблется в интервале  $Al_{ост} = (0,1 - 0,5)$  мг/дм<sup>3</sup>. При жесткости менее 1,8 мг-экв/дм<sup>3</sup> предельно допустимая концентрация (ПДК) остаточного алюминия ( $Al^{+3}$ ) не должна превышать 0,1 мг/дм<sup>3</sup>.

Алюминий и его соединения, попадая в организм человека-с питьевой водой в количествах, превышающих ПДК, оказывают отрицательное воздействие на нервную систему, обмен веществ и развитие клеток. Избыток железа в коллоидной окиси железа гемосидерина разрушает клетки печени.

В связи с этим в процессе экспериментов определяли содержание в воде алюминия, железа и марганца (см. табл.2).

Таблица 2

Величины концентраций ионов железа, марганца и алюминия в зависимости от изменения напряженности постоянного электрического

E, В/см	ПОЛЯ							
	0 (исх. вода)	30	35	40	45	50	55	60
$C_{Fe}$ , мг/дм <sup>3</sup> (ПДК = 0,3)	1,21	0,83	0,61	0,43	0,21	0,19	0,18	0,17
$C_{Mn}$ , мг/дм <sup>3</sup> (ПДК = 0,1)	0,2	0,15	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08	0,08
$C_{Al}$ , мг/дм <sup>3</sup> (ПДК = 0,5)	0,35	0,25	0,22	0,21	0,19	0,18	0,18	0,17

Процессы, происходящие при напряженности электрического поля  $E = 45$  В/см обеспечивают концентрации  $Fe$  и  $Mn$  ниже значений ПДК.

Температурная зависимость удельной проводимости хорошо описывается уравнением Аррениуса:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{RT}\right) \quad (3)$$

со средними значениями энергии активации ( $\Delta W$ ), лежащими в диапазоне от 20 до 42 кДж/моль, что достаточно хорошо совпадает со значением энергии водородной связи для таких систем (см. табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты уравнения Аррениуса

Напряженность электрического поля (E, В/см)	Предэкспоненциальный множитель ( $\gamma_0$ , I/(Ом·м))	Энергия активации ( $\Delta W$ , кДж/моль)	Коэффициент детерминации
0	$8,148 \cdot 10^2$	23,941	0.994
30	$4,865 \cdot 10^3$	42,323	0.997
35	$2,147 \cdot 10^3$	40,528	0.996
40	$1,714 \cdot 10^4$	34,412	0.965
45	$4,350 \cdot 10^3$	31,113	0.936
50	$1,984 \cdot 10^3$	29,176	0.932
55	$2,806 \cdot 10^2$	24,290	0.955
60	$5,032 \cdot 10^2$	25,703	0.948

Современная теория устойчивости и коагуляции лиофобных дисперсных систем. Дерягина - Ландау - Фервея - Овербека (теория ДЛФО) рассматривает агрегативную устойчивость как результат баланса сил молекулярного (ван-дер-ваальсового) притяжения и сил электростатического отталкивания между дисперсными частицами. Двойной электрический слой (ДЭС) частиц при их сближении, и возникновении электростатических сил отталкивания увеличивается с ростом электрохимического потенциала частиц (толщины ДЭС). Теория ДЛФО позволяет рассчитать энергию взаимодействия частиц, находящихся в ближнем потенциальном минимуме.

Баланс сил притяжения и отталкивания между частицами твердой фазы является сложной функцией расстояния между ними (концентрации дисперсных частиц) и характеризуется двумя минимумами, соответствующими двум равновесным состояниям системы (минимум свободной энергии), - так называемыми ближней и дальней потенциальными ямами с потенциальным барьером между ними. При взаимодействии двух частиц толщина равновесной гидратной пленки составляет от 5 до 50 нм (меньшее значение соответствует состоянию системы в ближней потенциальной яме). Незначительные величины силы взаимодействия обуславливают обратимый характер их образования и разрушения.

Следует отметить, что если глубина потенциальной ямы ближнего минимума уменьшается с ростом концентрации электролита, то значение дальнего потенциального минимума несколько увеличивается. При этом исчезает потенциальный барьер между ними. Однако в работе А. А. Веденова показано, что свободная энергия системы не ограничивается наличием двух минимумов, а носит осциллирующий характер, меняясь по абсолютной величине в равной мере между положительными и отрицательными значениями. Она уменьшается с

увеличением расстояния между пластинами, т. е. эффект регулярной укладки молекул жидкости между пластинами ослабевает и сила взаимодействия между ними приближается к обычному значению ван-дер-ваальсовой силы между двумя толстыми пластинами.

Таким образом, осциллирующий характер сил взаимодействия между частицами дисперсной фазы позволяет предположить наличие и более дальних энергетических минимумов взаимодействия этих частиц, т. е. наличие более дальних потенциальных ям.

Это имеет принципиальное значение для электрокоагуляционных процессов при очистке воды. Вопрос только заключается в том, какова величина такого энергетического минимума. Если она сопоставима с энергией теплового движения частиц  $kT$  ( $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура), то какие процессы необходимы для увеличения глубины такой потенциальной ямы, чтобы не произошло ее "размывание" за счет исчезновения энергетического барьера, предотвращающего термическую деструкцию коагуляционных структур.

В работе анализируются теории ван-дер-ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия, которые привели к представлениям о дипольных составляющих этих сил: на основе теории Бора - между постоянными диполями (силы Кеезома), постоянным и наведенным диполями (силы Дебая); на основе квантовой механики - между мгновенными диполями (силы Лондона) дисперсионной составляющей (в результате флуктуации электронной плотности).

Существует предположение, что дальнедействующее притяжение между молекулами определяют лондоновские дисперсионные силы. Действительно, индукционная составляющая для газов равна « 5%, ориентационная составляющая достаточно велика для полярных молекул (например, для  $H_2O$ ), но в отличие от других составляющих обратно пропорциональна температуре. Дисперсионная составляющая для

слабополярных молекул достигает 100% . Расчет показывает, что в воде энергию обуславливают в основном водородные и дипольные взаимодействия ( $\sim 50$  мДж/м<sup>3</sup>), а дисперсионные - только около 30 % ( $\sim 20$  мДж/м<sup>3</sup>).

Для расчета потенциальной энергии притяжения воспользовались уравнением Гамакера, характеризующим притяжение между двумя сферами радиуса ( $r$ ) и рассчитали номинальное расстояние между поверхностями частичек ( $H_0$ ) при условии  $H \ll r$ : допустим, что  $r = 120$  нм. Тогда при расстоянии  $H_0 = 1$  нм  $U \approx 10$  кТ, а при  $H_0 = 5$  нм  $U \approx 2$  кТ. И тем образом, между частичками должно произойти притяжение на расстояние 5 нм, так как потенциальная энергия взаимодействия заметно превышает энергию теплового движения ( $3/2$  кТ) для трех степеней свободы движения. Следовательно, можно предположить, что для дисперсных систем (без учета адсорбционных слоев и возникновения ДЭС) ван-дер-ваальсово притяжение распространяется на (5 — 10) нм, т.е. при разработке методов стабилизации таких систем лондоновское притяжение играет существенную роль, как по величине, так и по масштабу действия.

Следовательно, для водных суспензий, обусловленных образованием ДЭС в результате гидратации обменных ионов, толщина слоя характеризуется дебаевской длиной ( $1/\kappa$ ). Оценочный расчет  $1/\kappa$  для водных суспензий дает значение  $\approx 34,2$  нм, т. е. на этом расстоянии (для двух частиц -  $1/\kappa \approx 70$  нм) возможно дальнейшее взаимодействие частичек, отвечающее второму минимуму ( $2h \approx 10^2$  нм,  $h$  - расстояние между частицами).

Полученные в ходе исследований результаты согласуются с данными, приведенными в литературе, и позволяют сделать вывод о возможности применения при разработке установок и методов оптимизации электрокоагуляционных процессов для получения питьевых

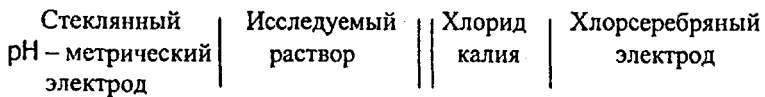
вод, данные исследования экстремума  $\left(\frac{\partial \gamma}{\partial E}\right)$  по уравнению (1) и анализа уравнения (2).

**В четвертой главе** приведены результаты электрохимических исследований воды, прошедшей электрокоагуляционную доочистку.

Для обоснования и уточнения оптимизации процесса электрокоагуляционной очистки водопроводной воды в установке «Водолей-50» при изменении напряженности постоянного электрического поля от 30 до 60 В/см, проведены исследования по изучению процессов изменения равновесного водородного потенциала воды ( $\Delta\phi$ ).

В работе рассматриваются электрохимические методы оценки термодинамического состояния таких систем, которые позволяют путем измерения равновесных потенциалов (измерение ЭДС в цепях без переноса) рассчитать значения химических потенциалов ( $P = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ ) и изменения этого состояния в процессе изменения температуры ( $P = \text{const}$ ).

Измерения ЭДС ( $\Delta\phi$ ) гальванического элемента осуществляли по схеме:



Экспериментальные значения ЭДС приведены на рис. 3.

Проведенные исследования показали нелинейное изменение  $\Delta\phi$  от напряженности постоянного электрического поля ( $E$ ), которое описывается уравнением полинома в виде:  $\Delta\phi = \epsilon_0 + \epsilon_1 E + \epsilon_2 E^2$ , (см рис. 3).

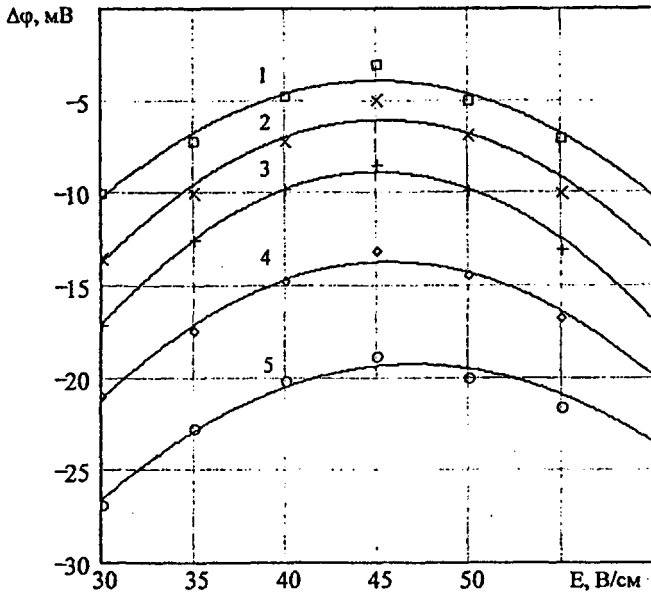


Рис.3. Зависимость равновесного водородного потенциала воды от напряженности электрического поля для различных значений температуры:

1 -  $T = 17^{\circ}\text{C}$ , 2 -  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , 3 -  $T = 23^{\circ}\text{C}$ , 4 -  $T = 26^{\circ}\text{C}$ , 5 -  $T = 29^{\circ}\text{C}$

Значение коэффициентов  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  представлены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты уравнения полинома функции  $\Delta\phi = f(E)$

для различных значений температуры

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициенты уравнения полинома			Коэффициент детерминации
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	
17	-61.414	2.556	-0.028	0.973
20	-74.145	3.006	-0.033	0.958
23	-83.081	3.296	-0.037	0.992
26	-76.905	2.770	-0.030	0.987
29	-75.745	2.406	-0.026	0.968

Зависимость рН воды как функции рН (E) представлена в таблице 5.

Таблица 5

**Зависимость рН воды, прошедшей электрокоагуляционную обработку, от напряженности электрического поля при различных значениях температуры ( $pH = h_0 + h_1E + h_2E^2$ )**

Температура, °С	Коэффициенты уравнения полинома			Коэффициент детерминации
	$h_0$	$h_1$	$h_2$	
17	7.063	-0.014	$1.783 \cdot 10^{-4}$	0.823
20	7.182	-0.016	$1.955 \cdot 10^{-4}$	0.896
23	7.370	-0.022	$2.491 \cdot 10^{-4}$	0.958
26	7.398	-0.017	$1.802 \cdot 10^{-4}$	0.962
29	7.736	-0.026	$2.707 \cdot 10^{-4}$	0.990

Исследования функции  $\Delta\phi(E)$  на экстремум ( $\frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial E} = 0$ ) показало, что напряженность электрического поля, соответствующего максимуму  $\Delta\phi$  и минимуму водородного показателя рН описывается линейными уравнениями:  $E = c_1 \cdot T + d_1$ ; ( $c_1 = 0,143$ ,  $d_1 = 42,282$ ) – для  $\Delta\phi$  и

$$E = c_2 \cdot T + d_2 ; (c_2 = 0,706, d_2 = 27,798) - \text{для рН,}$$

что позволяет использовать эти соотношения для выбора оптимального значения напряженности электрического поля при различных температурах.

Температурная зависимость  $\Delta\phi$  описывается уравнением Аррениуса (3) со значениями энергии активации ( $\Delta W$ ), превышающими энергию водородной связи.

Температурная зависимость рН воды также описывается экспоненциальным уравнением (3) со значениями  $\Delta W$  от 2 до 5 кДж/моль (см. табл. 6).

Следовательно, процессы депротонизации могут приводить к развитию коагуляционных взаимодействий и формированию пространственной структуры уже при незначительных концентрациях

дисперсной фазы, что подтверждается данными по изменению электрокинетических параметров таких систем. Однако глубина дальнейшей потенциальной ямы незначительна ( $\Delta G \approx (3 \div 4 \text{ кДж/моль})$ ), что сопоставимо с энергией теплового движения частиц ( $RT \approx 2,5 \text{ кДж/моль}$ ), и при увеличении температуры структурообразование системы затрудняется.

Таблица 6  
Зависимость рН воды, прошедшей электрокоагуляционную обработку, от температуры при различных значениях напряженности электрического поля

Напряженность электрического поля (E, В/см)	Предэкспоненциальный множитель (рН) <sub>0</sub>	Энергия активации ( $\Delta W$ , кДж/моль)	Коэффициент детерминации
0	60.582	5.194	0.934
30	24.361	3.058	0.965
35	25.534	3.199	0.975
40	23.831	3.041	0.981
45	24.167	3.083	0.972
50	23.477	3.008	0.966
55	20.947	2.717	0.966
60	16.962	2.169	0.973

Для изучения величины стабилизации свойств обработанной в электрическом поле воды были проведены исследования по релаксации этих свойств. Оказалось, что стабилизация свойств, по удельной электропроводности, равновесного водородных потенциала и рН, сохраняются в течение 4 суток, что вполне достаточно для сохранения стабильности этих свойств.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследованы электрокинетические и электрохимические явления в процессах электрокоагуляционной доочистки водопроводной питьевой воды. Показано, что удельная электрическая проводимость воды, прошедшей обработку в постоянном электрическом поле, претерпевает

резкое снижение, выходя на стационарное изменение при параметрах напряженности поля в 40-45 В/см, что свидетельствует об успешности прохождения процесса электрокоагуляционной доочистки воды и оптимизации величины напряженности поля в этих пределах в границах безопасной разности потенциалов на электродах.

2. Установлены математические зависимости удельной электропроводности и равновесного водородного потенциала воды, обработанной в постоянном электрическом поле, от напряженности этого поля и температуры. Показано, что в исследованном температурном интервале энергия активации процесса лежит в пределах от 5 до 20 кДж/моль, что является характерным для энергии водородной связи и дает возможность в дальнейшем априори определять параметры электрического поля по данным температурной зависимости.

3. Установлены математические зависимости по оптимизации напряженности постоянного электрического поля в исследованных процессах.

4. Предложена методика определения критерия достаточности (оптимизации) процесса электрокоагуляционной доочистки питьевой воды в зависимости от напряженности постоянного электрического поля в границах безопасного напряжения на электродах. Показано, что в области температур от 17 до 26 °С в качестве критерия достаточности (оптимизации) процесса электрокоагуляционной полноты очистки питьевой воды возможно использование стабилизации изменений ее удельной электрической проводимости и равновесного водородного потенциала.

5. Установлено, что сочетание исследований по сопоставлению электрокинетических и электрохимических явлений, развивающихся в воде при ее обработке в постоянном электрическом поле, дает возможность принятия решения об успешности прохождения процесса

электрокоагуляционной доочистки воды и оптимизации величины напряженности поля. в пределах (40 - 45) В/см в границах безопасной разности потенциалов на электродах.

6. Установлено, что степень стабилизации изменения свойств обработанной в электрическом поле воды может быть определена по исследованию времени релаксации в течение одних суток с устойчивыми показателями электрокинетических и электрохимических показателей в течение 4-х суток.

#### Список публикаций по теме диссертации

1. Шантарин В.Д. Электрокоагуляционный метод доочистки питьевой воды. / Шантарин В. Д., Воробьева С. В., Завьялов В. В. и др.

// 7-ая Международная научно-практическая конференция "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-7-2001)", 17-19 сентября 2001 г., г. Томск, ч.1. - С. 101-103.

2. Шантарин В. Д. Мембранная технология доочистки питьевой воды. / Шантарин В. Д., Воробьева С. В., Завьялов В. В. и др. // 7-ая Международная научно-практическая конференция "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-7-2001)", 17-19 сентября 2001 г., г. Томск, ч. 1. - С. 103-105.

3. Шантарин В. Д. Разработка технологии доочистки и структурирования питьевой воды внешними электромагнитными полями в профилактических, лечебных и адаптогенных целях. / Шантарин В. Д., Шехурдина Л. В., Завьялов В. В. и др. // 7-ая Международная научно-практическая конференция "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-7-2001)", 17-19 сентября 2001 г., Томск, ч.1. - С. 105-108.

4. Завьялова И.В. Совершенствование ресурсосберегающей технологии разделения геодисперсий в экономических целях / Завьялова И. В., Илларионова Е. Г., Завьялов В. В. // 7-ой Международный научный симпозиум им. академика М. А. Усова 14-18 апреля 2003 г., г. Томск. - С. 35-38.

5. Илларионова Е. Г. "Электрокоагуляционный метод доочистки питьевых вод. / Илларионова Е. Г., Завьялова И. В., Завьялов В. В. // 7-ой Международный научный симпозиум им. академика М. А. Усова 14-18 апреля 2003 г., г. Томск. - С. 39-41.

6. Завьялов В. В. Оптимизация величины напряженности электрического поля по электропроводности питьевой воды, прошедшей электрокоагуляционную доочистку. / Завьялов В. В., Шантарин В. Д. // Международная научно-техническая конференция "Нефть и газ Западной Сибири", посвященная 40-летию ТюмГНГУ. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2003 г. - С. 209-210.

7. Завьялов В. В. Электрохимические исследования воды, прошедшей электрокоагуляционную доочистку. / Завьялов В. В., Шантарин В. Д. // Международная научно-техническая конференция "Нефть и газ Западной Сибири", посвященная 40-летию ТюмГНГУ. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2003 г. - С. 211-212.

8. Шантарин В. Д. Оптимизация процессов электрокоагуляционной доочистки питьевых вод. / Шантарин В. Д., Завьялов В. В. // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Сб. обзорной информации - М.: ВИНТИ, № 5, 2003 г. - С. 62-85.

9. Завьялов В. В. Электрокинетические явления в процессах электрокоагуляционной доочистки питьевой воды. / Завьялов В. В., Шантарин В. Д. // «Известия ВУЗов. Нефть и газ». - Тюмень: ТюмГНГУ, №6, 2003 г. - С. 105-112.

РНБ Русский фонд

2004-4

17888

-23

Подписано к печати 5 01.04

Заказ № 3

Формат 60x84 1/16

Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. писч. №1

Уч. - изд. л. 105

Усл. печ. л.

Тираж 100 экз.

**Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52