

На правах рукописи

**КРАВЧЕНКО НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННО-СОРЕБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ  
ФЕНОЛСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность 25.00.36 - Геоэкология

/технические науки/

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Тюмень, 2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Шантарин Владислав Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор  
Ганяев Владимир Петрович

кандидат химических наук, доцент  
Кертман Сергей Витальевич

Ведущая организация: ОАО институт «Нефтегазпроект»

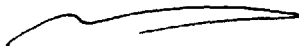
Защита диссертации состоится 29 апреля 2005 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу:

625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. ТюмГНГУ, зал им. Косухина А.Н.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТюмГНГУ.

Автореферат разослан *«18» марта* 2005 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



СИ. Челомбитко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Создание условий для жизни и здоровья нации основаны на сохранении природы, что является приоритетным направлением, обеспечивающим устойчивое развитие Российской Федерации. По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2002 году» ежегодно в реки России сбрасывается около 3 млрд. м<sup>3</sup> неочищенных сточных вод, что противоречит требованиям Федерального закона «Об охране окружающей среды» и «Экологической доктрины Российской Федерации». Водоотведение и очистка сточных вод оказывает существенное влияние на качество питьевой воды, определяя экологическое состояние биосферы в целом.

В настоящее время продолжается рост концентрации токсичного поллютанта - фенола в водных объектах Российской Федерации, обусловленное сбросом сточных вод нефтехимических и нефтеперерабатывающих заводов, компаний по производству фармацевтических препаратов, строительных материалов, а также ливневыми стоками железнодорожных магистралей и автозаправочных станций. Повышенное содержание фенола свыше 10 ПДК в водных объектах Тюменского региона определяется совокупностью климатических, геологических и морфологических факторов, что приводит к снижению процессов самоочищения в водоемах. В результате биохимической деструкции фенола в воде происходит изменение всех элементов гидрохимического режима, нарушается нормальный ход эмбриогенеза живых организмов.

В реке Туре превышенные концентрации фенола (в. 15 раз) существенно отражаются на здоровье людей, вызывая заболевания кожи,

эндокринной и иммунной системы людей. Поэтому фенол является опасным веществом.

Возникает необходимость создания региональной программы «Сточные воды», основой которой является экологическая защита водоисточников - предотвращение и ликвидация сброса неочищенных бытовых, производственных и ливневых сточных вод.

Необходимы новые технологии обезвреживания фенолсодержащих сточных вод (ФСВ), позволяющие решить проблему обеспечения экологической безопасности Российской Федерации. Поэтому очистка сточных вод, содержащих фенол, представляя научный и практический интерес, является актуальной задачей.

**Цель работы** заключается в разработке технологических решений очистки фенолсодержащих ливневых сточных вод и реализации этих решений в Западно-Сибирском регионе.

Достижение указанной цели осуществляется путем решения следующих **основных задач**:

- установления влияния физико-химических параметров процесса взаимодействия «вода-фенол» на режимы очистки сточных вод;
- определения оптимальных режимов газохроматографического анализа фенола в сточных водах;

обоснования электрокоагуляционного процесса для очистки фенолсодержащих сточных вод;

выбора оптимальных параметров электрокоагуляции и сорбции для очистки фенолсодержащих ливневых сточных вод.

### **Научная новизна**

1. Разработан комбинированный метод очистки фенолсодержащих сточных вод, в основе которого лежит применение электрокоагуляционной обработки в постоянном электрическом поле и сорбции фенола на бентоните.

2. Определены значения энергий активации ( $E_a$ ) и Гиббса ( $\Delta G$ ) процесса гидратации фенола концентрацией 0,001 мг/л:  $E_a = 6,7$  кДж/(кмоль·К) и  $\Delta G = -10,6$  кДж/моль.
3. Определены оптимальные режимы газохроматографического анализа фенола в сточных водах на газовом хроматографе CHROM-5: давление газа-носителя гелия  $p = 0,0606$  МПа, температура пламенно-ионизационного детектора  $T = 463$  К; температура испарителя  $T = 463$  К и температура термостата  $T = 503$  К.
4. Установлены закономерности повышения степени очистки сточных вод, содержащих фенол при применении электрокоагуляционно-сорбционного метода.

#### **Практическая значимость**

1. Проведение экологического мониторинга ливневых сточных вод позволяет разработать программу по введению штрафных санкций для автозаправочных станций, приводящих своей деятельностью к загрязнению окружающей среды.
2. Разработанные методические указания для проведения газохроматографического анализа сточных вод могут быть использованы как метод оценки состояния окружающей среды.
3. Разработана технологическая схема и рекомендации режимов при проектировании аппаратов для очистки сточных вод, содержащих фенол.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на Шестом Международном конгрессе «Вода: экология и технология. ЭКВАТЭК-2004», Москва, 1-4 июня 2004 г.; на Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Тюменской области и 10-летию Тобольского индустриального института, ТГПИ имени Д.И. Менделеева, Тобольск, 4 октября 2004 г.; на 10-й Международной конференции «Природные и

интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-10-2004)», Новосибирск, 5,6 октября 2004 г.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа изложена на 136 страницах компьютерного набора. Она состоит из введения, четырех разделов, выводов, приложения и списка использованных литературных источников. Диссертация содержит 17 таблиц и 16 рисунков. Библиографический список содержит 194 наименования.

Автор выражает искреннюю благодарность за научное руководство доктору технических наук, профессору Шантарину Владиславу Дмитриевичу, старшему преподавателю Дрогалеву Владимиру Викторовичу за помощь в выполнении работы.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования.

**Первый** раздел посвящен анализу санитарно-гигиенических и химических показателей воды. Учитывая экологическое состояние водных ресурсов и усиление антропогенного влияния на окружающую среду, возникает необходимость введения фенола в список основных показателей полного санитарно-гигиенического и химического анализа. Сделан вывод, что установление оптимальных режимов и параметров очистки фенолсодержащих сточных вод возможно при исследовании физико-химических свойств воды и фенола. Рассмотрены источники фенолсодержащих сточных вод, позволяющие определять максимальную концентрацию загрязняющего вещества в водной среде, что влияет на выбор оптимальных режимов очистки.

Дана краткая характеристика методам очистки сточных вод. Рассмотрена возможность применения каждого метода для обезвреживания

фенолсодержащих сточных вод. Анализ литературных данных показал, что для очистки ФСВ применяются химические методы - озонирование, окисление перекисью водорода; физико-химические - коагуляция, сорбция с использованием активированных углей, бентонита, гуминожелезозкремнеземного сорбента; биологические - с применением штаммов микроорганизмов. Показано, что наряду с традиционными физико-химическими методами очистки фенолсодержащих сточных вод проводятся исследования по использованию низкотемпературной плазмы. Изложена краткая характеристика метода адсорбции на основе молекулярной теории адсорбции Ленгмюра, теории полимолекулярной адсорбции и обобщенной теории Брунауэла, Эммета и Теллера (БЭТ). Отмечены преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых методов.

С точки зрения теории устойчивости лиофобных коллоидов Дерягина - Ландау - Фервея - Овербека (ДЛФО) и на основе работ Яковлева С.В., Красноротько И.Г., Смирнова О.В., Эстрела-Люпис В.Р., Шантарина В.Д., Воробьевой С.В. рассмотрены теоретические положения электрокоагуляционных процессов, протекающих в жидких дисперсных системах, и их практическая реализация для очистки сточных вод. Установлено, что положительный результат применения электрокоагуляции зависит от исследований физико-химических параметров водных растворов фенола.

**Второй раздел** содержит методики исследований ливневых сточных вод г. Тюмени, которые включают отбор проб, определение рН, температуры, перманганатной окисляемости и концентрацию фенола методом газохроматографического анализа. По результатам выполненных исследований установлены оптимальные режимы

проведения газохроматографического анализа по ИСО 8165 на аналитическом газовом хроматографе CHR0M-5 с температурой пламенно-ионизационного детектора 463 К, расходом газа-носителя гелия марки В на сбросе 30 мл/мин и его давлением на входе в колонку 0,0606 МПа, температурой испарителя 463 К и температурой термостата 503 К.

Динамика фенольного загрязнения ливневых стоков г. Тюмени в течение 2004 года на основе проведенного мониторинга состояния атмосферных стоков железнодорожной магистрали и автозаправочных станций позволила установить периоды, в течение которых отмечено наибольшее превышение предельно-допустимой концентрации (ПДК) в (20-5-60) раз: весенний паводковый (апрель-май) и летний (июль - август) (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные показатели качества ливневых стоков автозаправочных станций г. Тюмени в 2004 году

Наименование показателей, среднее значение	ПДК участков, используемых для отдыха населения, мг/л	Периоды (месяцы)		
		Апрель-май	Июль-август	Сентябрь-октябрь
$T_{ср}, K (^{\circ}C)$		280,3 (7,3)	289,8 (16,8)	281,1 (8,1)
pH	6,5÷8,5	6,8	6,4	7,0
Окисляемость перманганатная, мг/мл $O_2$	20,00	45,42	29,15	89,64
Концентрация фенола, мг/л	0,001	0,022	0,064	0,009

Причиной фенольного загрязнения ливневых стоков автозаправочных станций является экстрагирование фенолов из нефтепродуктов. Фенол, являясь гидрофильным веществом,

взаимодействует с водой путем ион-дипольного или диполь-дипольного механизма.

Исследование электропроводимости ( $\gamma$ ) электролита необходимо с точки зрения количественной оценки степени и константы диссоциации, межионных и молекулярных сил взаимодействия в растворе, а также проведения оценки размеров частиц, изменения разности потенциалов в процессе электролиза и установления оптимальных режимов электрокоагуляционной обработки.

Исследование температурной зависимости  $\gamma = f(T)$  (см. рис. 1 и 2) в диапазоне (277÷348) К (4÷75) °С для водных растворов, содержащих фенол концентрацией (мг/л): 0,001 ( $\gamma_1$ ), 10 ( $\gamma_2$ ) и 20 ( $\gamma_3$ ), а также для ливневых стоков ( $\gamma_4$ ), - показало, что они описываются уравнениями, имеющими вид:

$$\gamma_1 = 22,75 + 0,02 T + 9,64 \cdot 10^{-5} T^2; \quad \gamma_2 = 26,29 + 0,12 T + 3,99 \cdot 10^{-5} T^2; \\ \gamma_3 = 1,82 + 0,21 T + 3,54 \cdot 10^{-4} T^2 \quad \text{и} \quad \gamma_4 = 7,80 + 0,18 T + 1,18 \cdot 10^{-3} T^2,$$

где  $T$  выражена в градусах Цельсия.

Данные, представленные на рисунках 1 и 2, показывают, что увеличение концентрации фенола в  $10^4$  раз приводит к росту электропроводимости системы на порядок:  $\gamma_{1,2}$  изменяется в диапазоне  $(22 \div 34) \cdot 10^{-4}$  (Ом·см) $^{-1}$ ,  $\gamma_3$  - в диапазоне  $(2 \div 20) \cdot 10^{-3}$  (Ом·см) $^{-1}$ . Влияние загрязнения ливневых стоков, содержащих фенол концентрацией 0,06 мг/л, приводит к значительному увеличению  $\gamma$  до значений, которые изменяются в диапазоне  $(8 \div 30) \cdot 10^{-3}$  (Ом·см) $^{-1}$ , так как в них содержатся ионы  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и другие, что соответствует системе сильных электролитов. Сравнение изменения электропроводимости при повышении температуры модельного водного раствора фенола с концентрацией 20 мг/л и ливневых сточных водах позволило установить, что при этом система приближается к водным растворам сильных электролитов, что, очевидно, связано с ослаблением эффективности межионного и

межмолекулярного взаимодействия. Поэтому при концентрации фенола в воде, равной 20 мг/л, были проведены расчеты режимов очистки фенолсодержащих сточных вод.

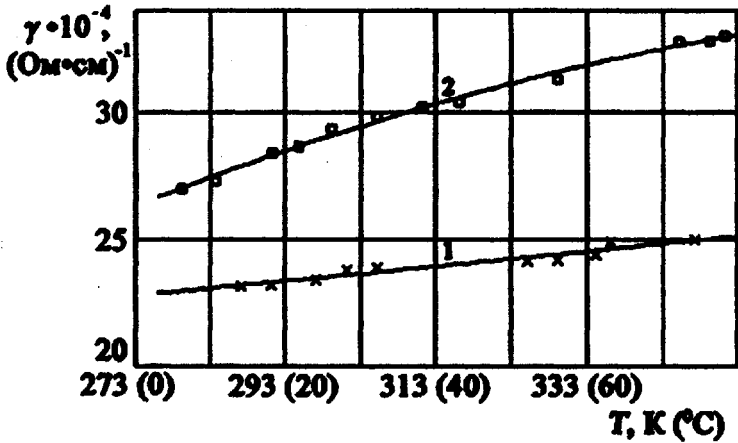


Рис. 1. Температурная зависимость ( $\gamma$ ) водного раствора фенола с концентрацией 0,001 (1) и 10 (2) мг/л

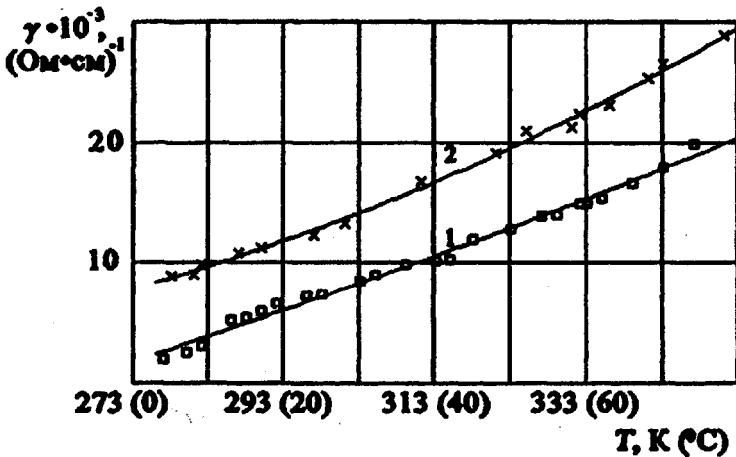


Рис. 2. Температурная зависимость ( $\gamma$ ) водного раствора с концентрацией фенола 20 мг/л (1) и воды ливневых стоков с концентрацией фенола 0,06 мг/л (2)

Экспериментальные данные обработаны в программе Mathcad Professional 2001. Показано, что коэффициенты детерминации находятся в пределах от 0,98 до 0,99, что свидетельствует о достоверности полученных результатов исследований, определяемых коэффициентом детерминации 0,75.

Исследование температурной зависимости равновесного водородного потенциала показали, что наблюдается их нелинейность в температурном диапазоне  $(277\div 353) \text{ K}$   $(4\div 80) \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 3); аналогично изменяется рН. Зависимость  $\Delta\varphi = f(T)$  для различных концентраций фенола в водном растворе, выражается уравнениями третьего порядка:  $\Delta\varphi = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$ , где  $a_0, a_1, a_2, a_3$ , - коэффициенты уравнения полинома функции  $\Delta\varphi = f(T)$  (см. табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты уравнения полинома функции  $\Delta\varphi = f(T)$   
при различных значениях концентрации фенола в водных растворах  
(Г - в градусах Цельсия)

Концентрация (с, мг/л)	Коэффициенты уравнения полинома				Коэффициент детерминации
	$-a_0$	$a_1$	$a_2$	$-a_3 \cdot 10^{-4}$	
20	89,9	0,36	0,03	4,42	0,99
10	89,9	0,02	0,04	4,91	0,99
0,01	119,7	1,44	0,02	2,11	0,98
0,001	122,1	1,02	0,01	1,41	0,98

Для нахождения точек условного экстремума функции  $\Delta\varphi = f(T)$  воспользовались условием:  $\frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial T} = 0$ .

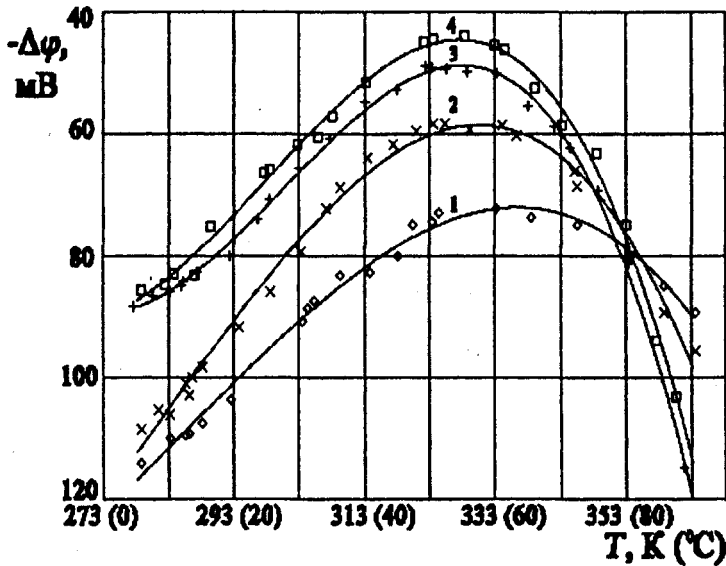


Рис. 3. Температурная зависимость равновесного водородного потенциала водных растворов фенола:  
1-4 - соответственно при концентрации: 0,001,0,01,10 и 20 (мг/л)

Были получены значения температур, удовлетворяющих условиям экстремума, которые находятся в диапазоне  $(323+333) \text{ K } (50+60) ^\circ\text{C}$ .

Учитывая температурную зависимость равновесного водородного потенциала, построенную в полулогарифмических координатах  $\ln(\Delta\phi) - (1/7)$  (см. рис. 4), были рассчитаны значения энергии активации ( $E_a$ ) процесса гидратации фенола. Найденные значения  $E_a$  равны: 26,6 кДж/(кмоль·К) при концентрации фенола  $c = 20$  мг/л; 23,3 кДж/(кмоль·К) при  $c = 10$  мг/л и 6,7 кДж/(кмоль·К) при  $c = 0,001$  мг/л. Экспериментально установленные значения  $\Delta\phi$  (см. табл. 3) гидратации фенола позволили вычислить значения изменения энергии Гиббса ( $\Delta G$ ):  $\Delta G = -nF\Delta\phi$ , где  $n$  - число электронов, участвующих в переносе заряда,  $F$  - постоянная Фарадея, Кл/моль.

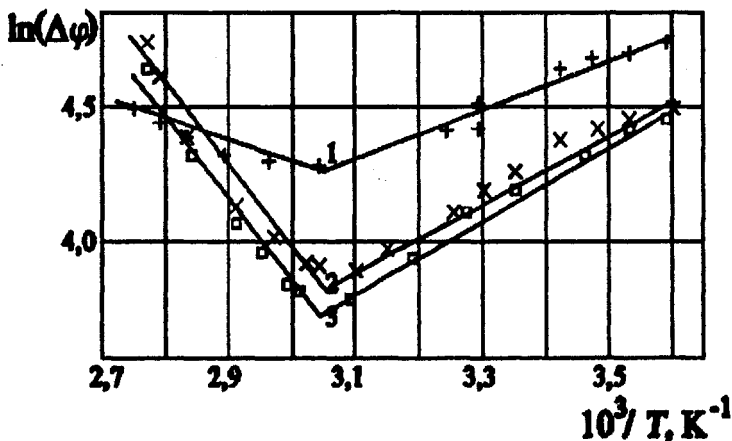


Рис. 4. Зависимость равновесного водородного потенциала в полулогарифмических координатах  $\ln(\Delta\varphi)$  от температуры ( $1/T$ ) для водных растворов фенола при концентрации: 1-3 – соответственно 0,001, 10 и 20 мг/л

Таблица 3

Значения изменения энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) процесса гидратации фенола

Концентрация фенола, с, мг/л	Температурный интервал, К ( $^{\circ}\text{C}$ )	$-\Delta G$ , кДж/моль
0,001	273÷283 (0÷10)	10,6
	283÷303 (10÷30)	8,8
	303÷313 (30÷40)	7,8
	313÷323 (40÷50)	7,2
	323÷353 (50÷80)	7,7
10	273÷283 (0÷10)	8,3
	283÷303 (10÷30)	6,3
	303÷312 (30÷39)	5,3
	312÷323 (39÷50)	4,7
	323÷344 (50÷71)	6,0
20	273÷283 (0÷10)	8,0
	283÷302 (10÷29)	5,9
	302÷313 (29÷40)	3,3
	313÷323 (40÷50)	4,8
	323÷352 (50÷79)	6,6

Уменьшение концентрации фенола приводит к уменьшению значений  $E_1$  и  $-\Delta G$ , что способствует образованию фенолят-ионов. Найденное значение энергии Гиббса процесса гидратации фенола концентрацией 0,001 мг/л при температуре 283 К (10 °С) сопоставимо с  $\Delta G$  коагуляционного взаимодействия частиц монтмориллонита в водном растворе, которая составляет  $\sim -11,7$  кДж/моль.

В третьем разделе рассматривается эффективность электрокоагуляционной обработки как метода, способного снизить концентрацию фенола в водных растворах и ливневых стоках до концентрации, равной ПДК водоемов, используемых для рыбохозяйственного и культурно-бытового назначения.

Для проведения процесса электрокоагуляции использовано постоянное электрическое поле (Е), напряженность которого изменялась от 55 до 80 В/см. Электрообработка проводилась на алюминиевых электродах площадью 450 мм<sup>2</sup> в течение 1800 с. Критерием выбора оптимальной величины Е являлось определение минимальной концентрации фенола (см. табл. 4) методом спектрофотометрического анализа (ПНД Ф14.1:2.104-97) и учет изменения величины рН (см. рис. 4) при соответствующей обработке в постоянном электрическом поле, напряженностью 55,60 и 80 В/см.

Результаты, представленные в таблице 4, показывают, что в течение 1800 с обработки электрическим полем напряженностью 55 и 60 В/см, степень очистки (L, %) составляет 99,44 и 99,29 % соответственно. В то же время концентрация фенола уменьшается всего до 0,112 и 0,141 мг/л, что выше значений ПДК, и поэтому очистку нельзя считать полной. Увеличение времени электрообработки водного раствора фенола не приводит к дальнейшему уменьшению концентрации фенола, что связано с

Таблица 4

Изменение концентрации фенола (с) и степени очистки (L) в зависимости от времени обработки в постоянном электрическом поле

Время обработки, (τ, с)	Напряженность электрического поля (E, В/см)					
	55		60		80	
	с, мг/л	L, %	с, мг/л	L, %	с, мг/л	L, %
0	20,010	-	20,010	-	20,010	-
300	19,461	2,74	18,120	9,45	19,951	0,29
720	17,772	11,18	7,453	62,75	18,474	7,68
1500	0,724	96,38	2,872	85,65	7,493	62,55
1800	0,112	99,44	0,141	99,29	6,542	67,31

уменьшением межмолекулярного взаимодействия между фенолом и алюминием.

Изменение рН воды, содержащей фенол, при обработке в электрическом поле показывает, что в течение первых пяти минут электрообработки более сильное влияние на изменение концентрации ионов  $\text{OH}^-$  оказывает напряженность электрического поля 80 В/см, что приводит к увеличению рН до 9,8, а при электрообработке напряженностью 60 и 55 В/см - до 9,1 и 9,3 соответственно. В последующем происходит уменьшение рН до 5,9, что является следствием формирования золь гидроксиды алюминия и его гидроксидных форм:  $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , - способных притягивать к себе фенолят-ион  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ .

Рекомендовано проводить электрокоагуляционную очистку фенол-

содержащих ливневых сточных вод в постоянном электрическом поле, напряженностью 55 В/см. Принимая значение  $\gamma = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$  (электропроводимость водного раствора фенола, концентрацией 20 мг/л при  $T=293 \text{ K (20}^\circ\text{C)}$ ) и значение напряженности электрического поля  $E_3 = 55 \text{ В/см}$ , установлена плотность тока на электродах ( $i_3$ ), необходимая для процесса очистки воды, содержащей фенол с максимальной концентрацией 20 мг/л:  $i_3 = 3,6 \text{ МА/см}^2$ .

Определяя общее напряжение на электролизере ( $U_{\text{общ}}$ ) как сумму равновесных электродных потенциалов ( $\varphi_a$ ) и ( $\varphi_k$ ), перенапряжения на электродах ( $\eta_a$ ) и ( $\eta_k$ ) и падения напряжения на преодоление электрического сопротивления в растворе ( $U_p$ ), электродах ( $U_a$ ) и контактах ( $U_{\text{конт}}$ ):  $U_{\text{общ}} = \varphi_a + \varphi_k + \eta_a + \eta_k + U_p + U_a + U_{\text{конт}}$ , - проведен теоретический расчет  $U_{\text{общ}}$ . При расчете учитывалось значение pH  $\sim 6$ , при котором достигается наилучшая степень очистки (см. рис. 4).

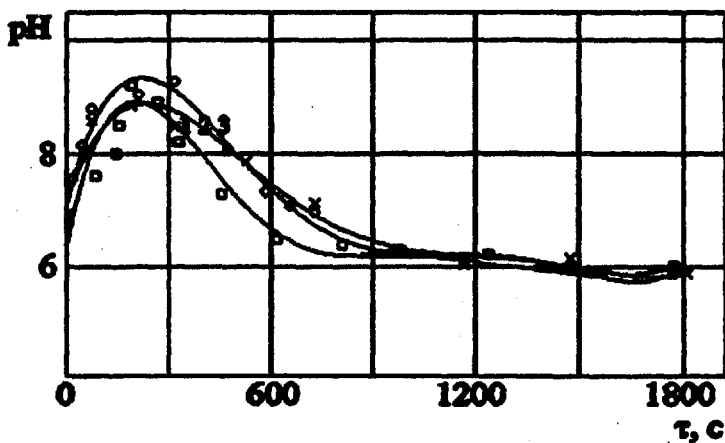


Рис. 4. Изменение pH воды, содержащей фенол, от времени обработки ( $\tau$ ) в электрическом поле, напряженностью 1-3 - соответственно: 80,60 и 55 В/см

Полученное значение  $U_{\text{общ}}$  соответствует 22,6 В.

Используя уравнения регрессии, полученного при помощи программы Mathcad Professional 2001 с коэффициентом детерминации 0,99, найдена зависимость  $U_{\text{общ}}$  ( $i$ ) для воды, содержащей фенол, концентрацией 20 мг/л:  $U_{\text{общ}} = 0,12 i + 27,9$ .

Экспериментально установлено, что  $U_{\text{общ}}$  принимает значение, равное 28,2 В. Расхождение между теоретически рассчитанным и экспериментальными значениями  $U_{\text{общ}}$  объясняется неучтенными при расчете величинами  $\eta_a$  и  $\eta_k$ , которые возможно при обработке в постоянном электрическом поле фенолсодержащих сточных вод играют немаловажную роль.

В работе выполнен расчет экологической безопасности электрокоагуляционной очистки фенолсодержащих сточных вод. Показано, что поддержание температуры не более 293 К (20 °С) не приводит к образованию хлорпроизводных фенола. Поэтому следует обеспечивать отвод тепла и регулирование температуры.

Результаты исследования показали, что применение метода электрокоагуляции в постоянном электрическом поле, напряженностью 55 В/см, для очистки фенолсодержащих ливневых сточных вод недостаточно эффективно, поэтому требуется дополнительная доочистка.

**Четвертый раздел** содержит результаты по очистке воды от фенола при использовании метода сорбции, как в виде отдельной стадии, так и в сочетании с электрокоагуляцией. В качестве сорбента использован бентонит, основным минералом которого является монтмориллонит с общей формулой  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ . Причина выбора основана на изучении теории агрегативной устойчивости дисперсных систем, анализа работ Шантарина В.Д., Кагановского А.М. и Дедусенко Г.Я. и

сопоставимостью полученных значений  $\Delta G$  для реакции гидратации фенола и известного значения  $\Delta G$  коагуляционного взаимодействия частиц монтмориллонита в водном растворе.

Определение концентрации фенола при использовании сорбента до и после электрообработки (см. табл. 5) позволило установить, что при сорбционной очистке на бентоните с концентрацией 0,1 и 0,5 % уменьшение концентрации фенола можно достичь до значений 2,47 и 0,23 мг/л соответственно при перемешивании в течение 900 с. Полученные результаты превышают допустимые значения ПДК для водоемов, используемых для рыбохозяйственного и культурно-бытового назначения.

Таблица 5

Результаты сорбционной очистки воды от фенола на бентоните

Концентрация бентонита, %	Время перемешивания, с	Концентрация фенола после сорбции на бентоните, мг/л	Концентрация фенола после электрообработки, мг/л
0,1	300	10,32	0,003
	900	2,47	<0,001
0,5	300	6,84	<0,001
	900	0,23	<0,001

Сочетание метода электрокоагуляции и сорбции является наиболее эффективным. При этом очистку рекомендовано проводить в последовательности: электрокоагуляция-сорбция, так как проведение сорбции перед электрокоагуляцией способствует загрязнению электродов бентонитом. Применение бентонита, концентрацией в 0,1 %, после электрокоагуляционной обработки при перемешивании в течение 900 с позволяет достичь концентрации фенола <0,001 мг/л.

Определено, что при использовании бентонита, концентрацией 0,1 %, необходимо проводить отстаивание не менее 10800 с (3 ч)

(см. табл. 6) для достижения степени прозрачности, равной 0,10 м (10 см), что соответствует СанПиН 2.1.5.980-00.

Таблица 6

Изменение степени прозрачности воды, прошедшей обработку в постоянном электрическом поле и сорбцию на бентоните

Концентрация глины, %	Время отстаивания, с (ч)	Степень прозрачности, м		
		Без электро-обработки и сорбции	Без электро-обработки	После электро-обработки и сорбции
0,1	1800 (0,5)	0,38	0,34	0,36
	3600 (1,0)	0,31	0,29	0,30
	5400 (1,5)	0,26	0,21	0,24
	7200 (2,0)	0,24	0,13	0,23
	9000 (2,5)	0,22	0,10	0,20
	10800 (3,0)	0,10	-	0,10
0,5	1800 (0,5)	0,42	0,38	0,39
	3600 (1,0)	0,34	0,27	0,32
	5400 (1,5)	0,23	0,10	0,21
	7200 (2,0)	0,10	-	0,10

**Приложения** в диссертационной работе содержат результаты по обработке экспериментальных данных, подтверждающих достоверность проведенных исследований.

### Основные выводы по работе:

1. Определены температурные зависимости  $\gamma$ ,  $\Delta\phi$  и рН. Рассчитаны значения энергии активации  $E_a$  процесса гидратации фенола. Установлено, что для водного раствора фенола, концентрацией 0,001 мг/л, при температуре 283 К изобарно-изотермический потенциал ( $\Delta G$ ) процесса гидратации фенола сопоставим с  $\Delta G$  коагуляционного взаимодействия частиц монтмориллонита в водном растворе, составляющего  $\sim -11,7$  кДж/моль.
2. Определены оптимальные режимы газохроматографического анализа фенола в сточных водах на газовом хроматографе CHROM-5: давление газа-носителя гелия  $p = 0,0606$  МПа, температура пламенно-ионизационного детектора  $T = 463$  К; температура испарителя  $T = 463$  К; температура термостата  $T = 503$  К.
3. Рекомендовано электрокоагуляционную обработку фенолсодержащих сточных вод проводить в однородном электрическом поле с алюминиевыми электродами, напряженностью электрического поля в  $55$  В/см,  $U_{\text{общ}} = 28,2$  В;  $i_3 = 3,6$  мА/см<sup>2</sup> и временем электрокоагуляции  $1800$  с (30 мин).
4. Установлено, что более эффективным является комплексное применение методов обработки в постоянном электрическом поле и сорбции на бентоните, заключающееся в технологической схеме: электрообработка - сорбция - отстаивание. Рекомендовано после обработки в постоянном электрическом поле проводить доочистку очищаемой воды на бентоните с концентрацией 0,1 % при перемешивании в течение  $900$  с (15 мин) и временем отстаивания  $10800$  с (3 ч).

### Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Вепренцева Н.Н. (Кравченко Н.Н.). Исследование удельной электропроводимости воды, прошедшей электрообработку в постоянном электрическом поле / Вепренцева Н.Н. (Кравченко Н.Н.), Шантарин В.Д.,

Завьялов В.В. // Материалы Шестого Международного Конгресса «Вода: экология и технология. ЭКВАТЭК-2004», г. Москва, 14 июня 2004. - М.: ГУЛ МО «Коломенская типография», 2004. - С. 476.

2. Вепренцева Н.Н. (Кравченко Н.Н.) Электрохимические исследования водопроводной воды, прошедшей электрокоагуляционную доочистку в электрическом поле / Вепренцева Н.Н. (Кравченко Н.Н.), Завьялов В.В., Шантарин В.Д. // Материалы Шестого Международного Конгресса «Вода: экология и технология. ЭКВАТЭК-2004», г. Москва, 14 июня 2004. - М.: ГУЛ МО «Коломенская типография», 2004. - С. 580.

3. Кравченко Н.Н. Нарушение экосистем водных объектов России фенолами и нефтепродуктами / Кравченко Н.Н., Шантарин В.Д. // Материалы Международной практической конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах», Белгород, 13-16 сентября 2004 г. - Белгород: Изд-во БелГУ, 2004.-С. 124-126.

4. Кравченко Н.Н. Влияние постоянного электрического поля на очистку сточных вод от фенола / Кравченко Н.Н., Шантарин В.Д. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Состояние биосферы и здоровье людей», г. Пенза, 29-30 сентября 2004 г.- Пенза: Изд-во «Приволжский дом знаний», 2004.- С. 33-35.

5. Кравченко Н.Н. Защита водных объектов от загрязнения фенолформальдегидсодержащими сточными водами Тюменского региона / Кравченко Н.Н., Шантарин В.Д. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Тюменской области и 10-летию Тобольского индустриального института «Социокультурная динамика и экономическое развитие Тюменского региона. XXI век», Тобольск, 4 октября 2004 г. - Тобольск: Изд-во ТПИ имени Д.И. Менделеева, 2004. - С.91-97.

6. Кравченко Н.Н. Проблемы очистки промышленных сточных вод России / Кравченко Н.Н., Шантарин В.Д. // Доклады 10-й Международной конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-10-2004)», Новосибирск, 5,6 октября 2004 г. - Томск: Изд-во Томского университета, 2004. - С. 121-125.
7. Кравченко Н.Н. Газовая хроматография как метод оценки экологического состояния сточных вод / Кравченко Н.Н., Шантарин В.Д. // Доклады 10-й Международной конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-10-2004)», Новосибирск, 5,6 октября 2004г. - Томск: Изд-во Томского университета, 2004. - С. 140-142.
8. Вепренцева Н.Н. (Кравченко Н.Н.) Газовая хроматография как метод оценки состояния окружающей среды / Кравченко Н.Н., Дрогалев В.В., Шантарин В.Д. // Методические указания к лабораторным работам. - Тюмень: Изд-во «Нефтегазовый университет», 2004. - 31 с.

Подписано к печати *25.02.05*  
 Заказ № *135*  
 Формат 60x90 1/16  
 Отпечатано на RISOGR 3750

Бум. писч. №1  
 Уч. изд.л. *1*  
 Усл. печ. л.  
 Тираж *100* экз.

Издательство «Нефтегазовый университет»  
 Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
 «Тюменский государственный нефтегазовый университет»  
 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38  
 Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»  
 625039, г. Тюмень, ул. Киевская, 52



25.00

1264



22 APR 2005