

**Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей  
среды (с международным участием)**

**Ивановская область**

**НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:**

**«Регенерация и модификация поверхности сорбента диатомита  
в плазме кислорода»**

**Автор работы:**

Ладихина Александра Николаевна,  
10 класс, МБОУ СШ №26 с углубленным изучением  
предметов естественнонаучного цикла г. Иваново  
(Химический лицей при ИГХТУ)

**Научный руководитель:**

Гусев Григорий Игоревич  
асп. Каф. ПЭ ФГБОУ ВО «ИГХТУ»

2020 г.

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	7
<b>АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ</b> .....	12
<b>ВЫВОДЫ</b> .....	18
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	19

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из экологических проблем современности является проблема загрязнения воды и ухудшения качества водных ресурсов, что приводит к уменьшению количества доступной воды питьевого качества. Проблемы загрязнения окружающей среды фенолом и его соединениями с каждым годом все более обостряются и начинают приобретать глобальный масштаб, поэтому становится актуальной разработка новых технологических схем очистки сточных вод от фенолов и их производных, которые должны соответствовать современным требованиям - быть максимально доступными, удобными, экологически безопасными и экономически целесообразными [1, 2].

Промышленные отходы приводят к загрязнению природных вод фенолами и хлорфенолами, которые делают воду непригодной для использования и токсичны для биологических объектов. Наиболее перспективным методом очистки воды от такого рода загрязнителей является адсорбционный метод. Увеличение срока службы адсорбентов и снижение в связи с этим капитальных и эксплуатационных затрат на очистку газов и жидкостей неразрывно связаны с внедрением эффективных способов регенерации адсорбентов, обладающих достаточно высокой надежностью. Однако, вопросы возможности регенерации адсорбента и аспекты деструкции фенола и его производных, таких как 2,4-дихлорфенол, с поверхности адсорбента в плазме диэлектрического барьерного разряда (ДБР) изучены недостаточно. Это и определило актуальность темы исследования.

Фенол относится к экологически опасным соединениям, так как приводит к нарушению функций нервной системы. Отравление фенолом проявляется в резком кратковременном возбуждении с последующим угнетением, судорогами и параличом дыхательного центра. Зачастую фенол является причиной онкологических заболеваний. Повышенное содержание фенола в воде приводит к ухудшению органолептических показателей, обуславливая появление специфического запаха. Применение хлора в качестве обеззараживающего агента в процессе водоподготовки загрязненных фенолом вод ведет к образованию еще более токсичных хлорфенолов, малейшие следы которых ( $0,1 \text{ мкг/дм}^3$ ) придают воде характерный привкус и делают ее непригодной для использования [5]. Использование недостаточно очищенной воды при приготовлении напитков может ухудшать их товароведческие свойства (изменять стойкость окраски, вкус, запах, содержание некоторых витаминов) [4, 5].

Одним из эффективных методов извлечения небольших количеств веществ из водных растворов является адсорбция, обеспечивающая высокую степень извлечения компонентов, а также возможность многократного использования адсорбентов. Применение рациональных способов регенерации сорбентов дает возможность обеспечить защиту атмосферы и водного бассейна и литосферы от загрязнений и вернуть ценные вещества в производство для повторного их использования. К числу новых и малоизученных способов

регенерации сорбентов можно отнести обработку сорбентов в диэлектрическом барьерном разряде (ДБР).

Барьерный разряд как средство получения плазменного состояния вещества широко используется в науке и технике. Один из примеров промышленного применения барьерного разряда для целей химического синтеза - получение озона, который широко используется в сельском хозяйстве, медицине и химической промышленности [1].

Под барьерным разрядом в настоящее время понимают разряд, возникающий в газе под действием приложенного к электродам переменного напряжения, при этом хотя бы один из электродов должен быть покрыт диэлектриком [1].

Барьерный разряд является широко используемым источником неравновесной плазмы. Его принцип действия весьма прост. Переменное напряжение поступает на электроды, покрытые диэлектриком. На диэлектрике наводится напряжение и в определенный момент происходит разряд. При этом ток ограничен диэлектриками, и разряд не переходит в дугу. Если разряд однороден, обычно пробой происходит один раз за полупериод [1]. В настоящее время основной интерес представляют плазмохимические процессы, происходящие в барьерном разряде в различных газовых смесях, поскольку понимание этих процессов необходимо для создания промышленных реакторов [1].

Термин «плазма» был введен в работе Ленгмюра и Тонкса в 1929 г. В связи с исследованием процессов в электронных лампах, наполненных ионизованным газом [1].

Плазмой называется квазинейтральный газ заряженных частиц. В наиболее распространенном случае плазма состоит из электронов и положительно заряженных ионов. В плазме могут присутствовать также нейтральные атомы: если их доля значительна, плазма называется частично или не полностью ионизованной [1].

Плазму подразделяют на низкотемпературную ( $T < 10$  эВ) и высокотемпературную ( $T \gg 10$  эВ). Хотя такое деление в значительной степени условно, оно отражает тот факт, что высокотемпературная плазма является полностью ионизованной, тогда как в низкотемпературной плазме обычно важным является учет наличия нейтральных частиц [2]. Неравновесная (низкотемпературная) плазма, характеризуется высоким уровнем энергии электронов, концентраций заряженных и возбужденных частиц, а также радикалов при низкой температуре газа [2]. В настоящее время, к наиболее перспективным методам очистки воды, применимым, например, для поверхностных стоков, то есть к системам с весьма сложным и непостоянным качественным составом, относят использование неравновесной газоразрядной плазмы барьерного разряда, позволяющей существенно повысить скорость деструкции органических соединений и соответственно, эколого-экономическую эффективность и которая характеризуется высоким выходом химически активных частиц [2].

Наиболее распространенным в лабораторной и технической практике способом генерации состояния плазмы является газовый разряд – прохождение тока через газ под действием высокого внешнего напряжения. В этом случае первичным процессом, определяющим существование плазмы, является ионизация молекул или атомов газа ударами энергичных электронов, ускоренных под действием внешнего электрического поля. Степень ионизации газа обычно не более  $10^{-4}$ . То есть плазма является слабоионизованной средой [3]. Особенностью плазменной системы является то, что в силу большого различия масс электронов и ионов, энергию от внешнего поля приобретают практически только электроны [3]. Поэтому первичными процессами активации являются процессы, связанные с электронным ударом [3]. Образующиеся возбужденные частицы и продукты их диссоциации начинают реагировать между собой, формируя состав активных частиц [3].

Регенерация сорбентов с помощью барьерного разряда является новой и малоизученной областью, поэтому изучение процессов, происходящих при обработке загрязнённых сорбентов в плазме барьерного разряда является весьма актуальной и важной задачей. Стоит отметить, что некоторые попытки регенерировать сорбционные свойства загрязнённых сорбентов с помощью плазмы барьерного разряда, всё же можно встретить. Так учёные из Китая в своей работе [4] проводили эксперименты по регенерации активированного угля, загрязнённого пентахлорфенолом в плазме двойного – диэлектрического барьерного разряда. В данной работе сточные воды, содержащие пентахлорфенол очищались путём адсорбции на активированном угле и в дальнейшем загрязнённый активированный уголь обрабатывался в реакторе в плазме двойного - диэлектрического барьерного разряда. Авторами было исследование влияние мощности разряда, времени обработки, и скорости потока плазмообразующего газа (кислорода) на деградацию пентахлорфенола и регенерацию активированного угля. Показано благоприятное влияние увеличения мощности разряда и времени обработки на деградацию пентахлорфенола и регенерацию угля. Построены изотермы адсорбции обработанного угля и измерена величина удельной поверхности чистого, насыщенного и обработанного активированного угля:  $790 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $487,8 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $526,9 \text{ м}^2/\text{г}$  соответственно. Видно, что в результате обработки, величина удельной поверхности возрастает лишь на 8%.

Выбор метода регенерации зависит также и от особенностей разрабатываемых технологических процессов, обусловленных природой используемых сорбирующих материалов. Интенсификация стадии регенерации, наряду с ускорением стадии адсорбции, позволит существенно оптимизировать технологию сорбционно-десорбционных процессов и положительным образом скажется на их экологических и экономических показателях.

Традиционно, для удаления фенолов и их производных из воды применяют такие природные сорбенты, как цеолиты [8], шунгиты [9], диатомиты, а также отходы промышленного производства [10-12] и переработки целлюлозосодержащей сельскохозяйственной продукции [13-22].

Особую категорию сорбентов представляют отходы деревообработки [23-27]. Достоинством названных материалов является то, что они имеют обширную сырьевую базу, дешевы и просты по способам получения и утилизации в сравнении с промышленно получаемыми синтетическими сорбентами. Публикаций, связанных с изучением сорбционных свойств отдельных сорбентов, а также после их модификации разнообразными физико-химическими методами, множество [10-27]. Однако, работ, в которых бы исследовалась возможность регенерации и модификации поверхности сорбентов практически нет.

Поэтому, целью работы являлось изучение возможности регенерации и модификации сорбента диатомита в диэлектрическом барьерном разряде (ДБР).

Задачами исследования являлись:

1. Изучение сорбционной ёмкости сорбента по фенолу и 2,4-дихлорфенолу;
2. Сравнение динамической и статической сорбционной ёмкости;
3. Изучение изменения сорбционной ёмкости загрязнённого сорбента после обработки в ДБР.

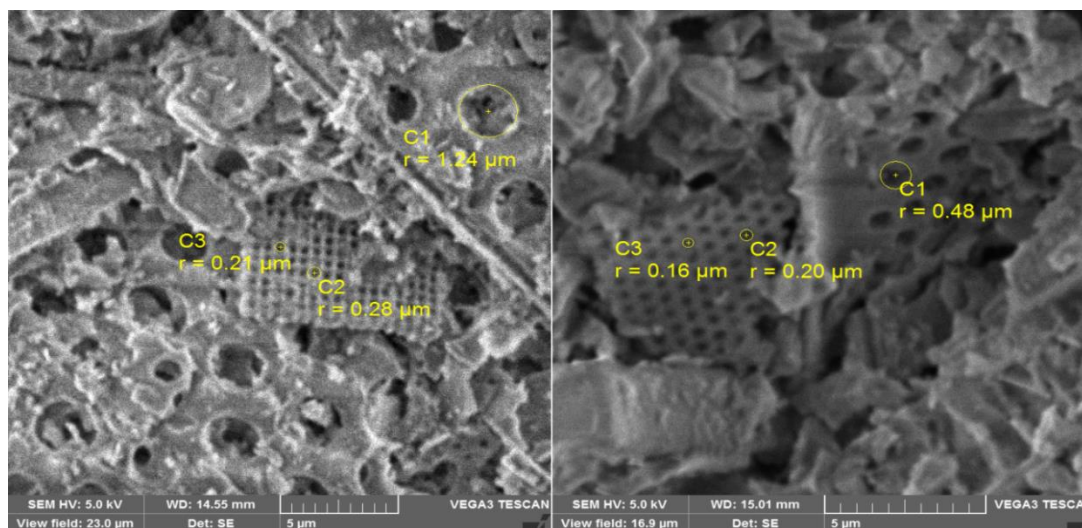
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили фенол и 2,4-дихлорфенол, а в качестве адсорбента использовали силикатный сорбент - диатомит марки СМД Сорб, представленный на (рис. 1).



**Рис. 1. Сорбент СМД Сорб диатомит**

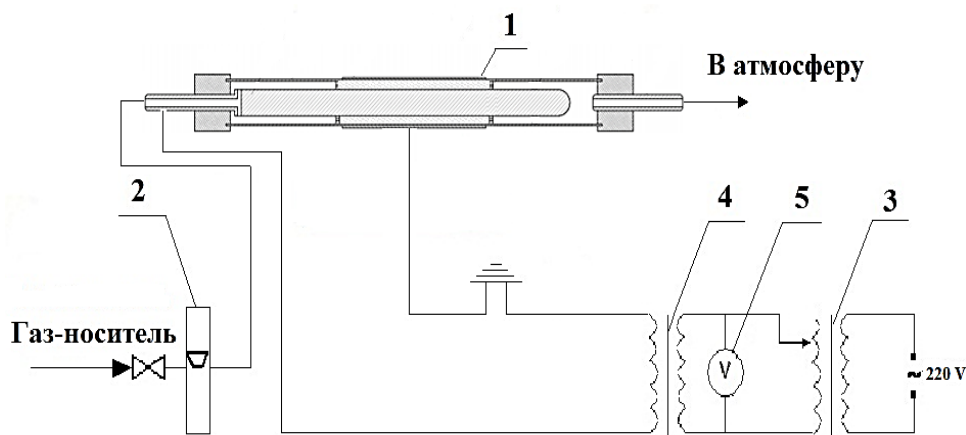
Поверхность сорбента, определенная с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3 SBH представлена на рис. 2



**Рис. 2. Поверхность сорбента диатомита марки СМД Сорб**

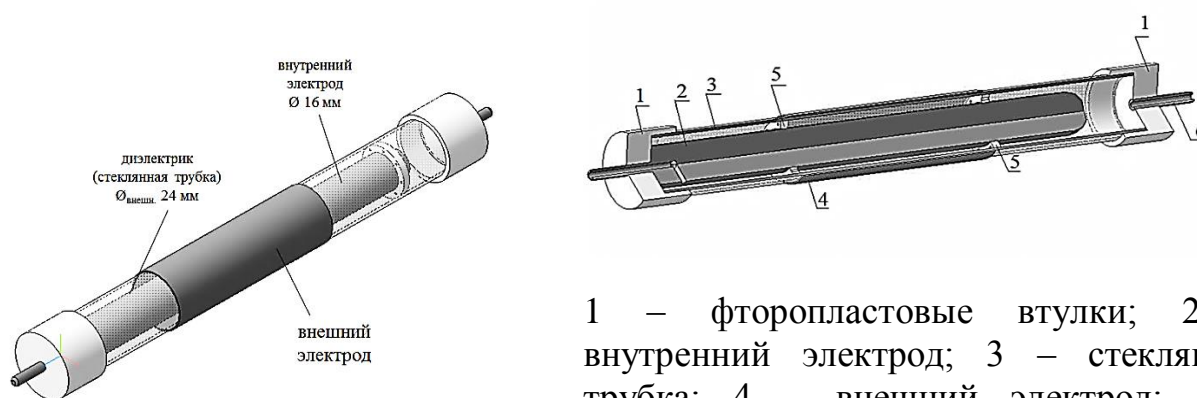
Поверхность сорбента обладает упорядоченной структурой, характерной для кизельгуровых пород. На поверхности преобладают поры макроразмеров диаметром 0,2-1,5 микрона.

В экспериментальной установке, куда помещали сорбент (рис. 3), использовался реактор ДБР с алюминиевыми электродами (рис. 4). В качестве плазмообразующего газа использовался кислород. Более подробное описание экспериментальной установки приведено в [29].



**Рис. 3. Схема экспериментальной установки**

1 - разрядник; 2 – ротаметр; 3 – ЛАТР; 4 – высоковольтный трансформатор; 5 – вольтметр.



1 – фторопластовые втулки; 2 – внутренний электрод; 3 – стеклянная трубка; 4 – внешний электрод; 5 – сорбент, удерживаемый кольцами; 6 – выходной патрубков.

**Рис. 4. Схема реактора ДБР**

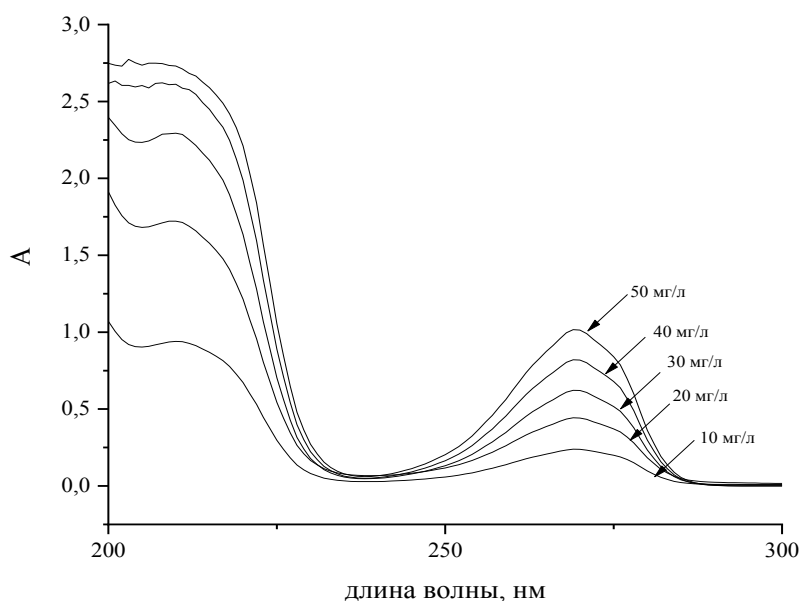
В работе были использованы следующие методы исследования, представленные в таблице 1.

Таблица 1

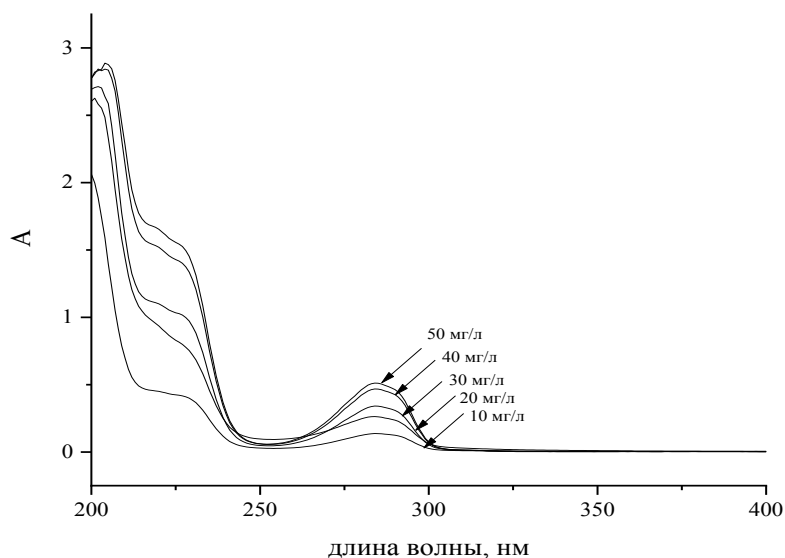
Методы исследования

Определение	Метод
2,4-ДХФ и фенол	Спектрофотометрический метод (ПЭ 5400-УФ)
Удельная поверхность и объем пор	Прибор для измерения удельной поверхности методом низкотемпературной адсорбции инертного газа-Sorbi- MS
Состав и поверхность	Сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA3 SBH

Концентрации фенола и 2,4-ДХФ в растворе определялись на спектрофотометре ПЭ 5400 УФ. Калибровочные зависимости от концентраций соединений в растворе были построены после изучения спектров растворов с пятью различными концентрациями для каждого вещества (рис. 5) и (рис. 6).

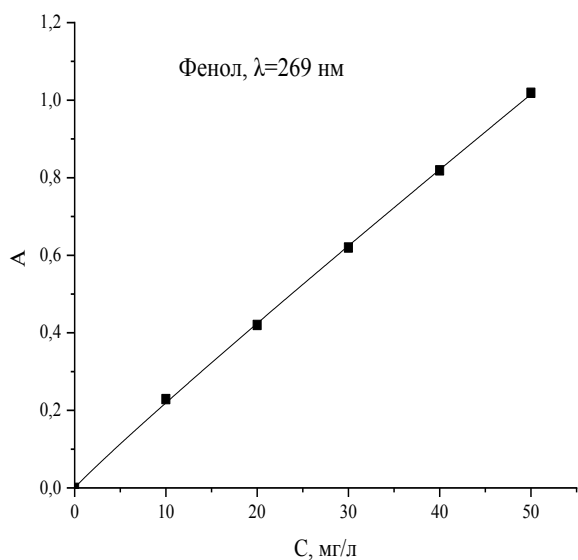


**Рис. 5. Спектры поглощения растворов фенола с концентрациями 10 - 50 мг/л**

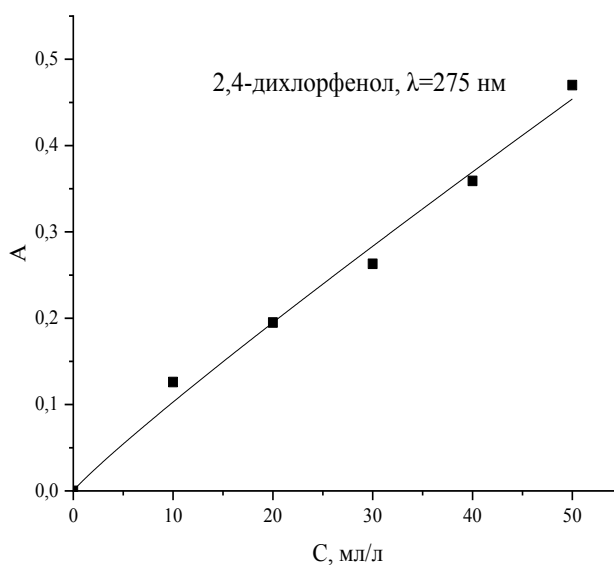


**Рис. 6. Спектры поглощения растворов 2,4-дихлорфенола с концентрациями 10 - 50 мг/л**

Было определено, что концентрацию фенола можно определять на длине волны равной  $\lambda = 269$  нм (рис. 7), а 2,4-дихлорфенол на длине волны  $\lambda = 275$  нм (рис. 8). Продукты деструкции и концентрация исходного соединения определялись в воде, которая центрифугировалась с загрязненным либо обработанным в ДБР сорбентом в течение 10 минут. Погрешность определения составляла порядка 10 %.



**Рис. 7. Калибровочная зависимость для определения концентрации 2,4-дихлорфенола в растворе спектрофотометрическим методом**



**Рис. 8. Калибровочная зависимость для определения концентрации 2,4-дихлорфенола в растворе спектрофотометрическим методом**

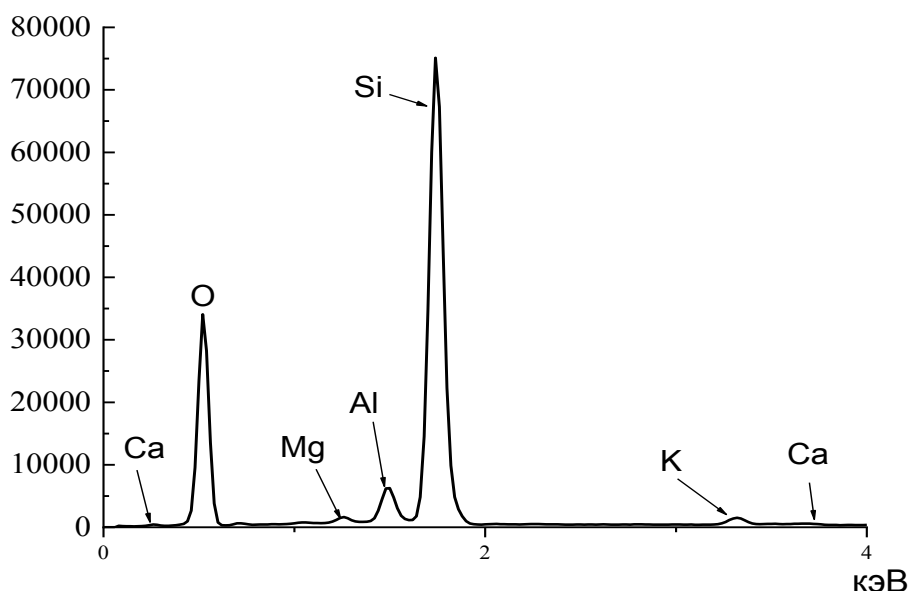
Параметры проведения обработки адсорбента в плазме ДБР представлены в таблице 3.

Таблица 3

Условия проведения эксперимента

Параметр	Значение	Единица измерения
Концентрация 2,4-ДХФ и фенола	10-50	мг/л
Частота	800	Гц
Мощность, вкладываемая в разряд	1,8	Вт/см <sup>3</sup>
Сила тока	4,9	мА
Напряжение	6,5	кВ
Расход плазмообразующего газа (O <sub>2</sub> )	0,5	л/мин
Масса сорбента	2000	мг
Время обработки адсорбента	60-300	секунды

Элементный состав диатомита был определен с использованием электродисперсионной сканирующей спектроскопии, и представлен на (рис. 9.)



**Рис. 9. Элементный состав диатомита (с использованием электродисперсионной сканирующей спектроскопии)**

Сорбционная ёмкость сорбента оценивалась по формуле:

$$J_i = \frac{V_0 \times (C_{0,i} - C_i)}{m}, \text{ мг/г,}$$

где  $J_i$  – сорбционная ёмкость, мг/г;  $V_0$  – объём пробы модельного раствора, пропущенный через сорбент, л;  $C_0$  и  $C$  – начальная и конечная концентрации веществ соответственно, мг/л;  $m$  – масса образца сорбента, г.

Изотермы адсорбции строились в координатах:  $Q_x = f(Q_y)$

где  $Q_x$  – равновесная концентрация вещества после пропускания через сорбент, мг/л,

$Q_y$  – сорбционная ёмкость сорбента, мг/г.

Водопоглощение определялось отношением массы поглощенной воды к массе сорбента, потраченного на сорбцию:

$$B = T_{\text{погл}} - T_{\text{сорб}} / T_{\text{погл}},$$

где:  $T_{\text{погл}}$  – масса сорбента с поглощенной водой, г;  $T_{\text{сорб}}$  – масса сорбционного материала, г;  $B$  — водопоглощение, г/г.

Влажность сорбента определяется по методике ГОСТ 12597-67 при высушивании навески продукта в сушильном шкафу до постоянной массы и определении уменьшения массы продукта. Массовая доля воды выражается в процентах.

Массовую долю воды ( $X$ ) в процентах вычисляют по формуле:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100,$$

где  $m$  – масса стаканчика с крышкой, г;

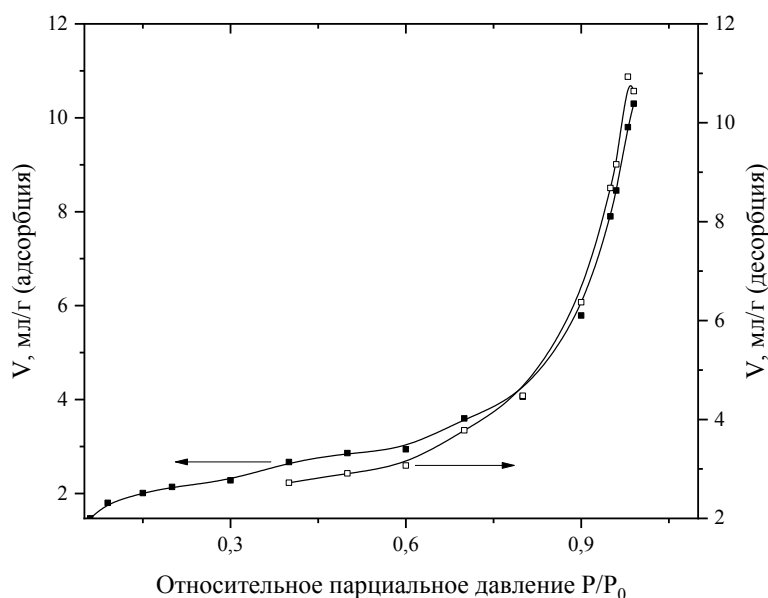
$m_1$  – масса стаканчика с крышкой и навеской до высушивания, г;

$m_2$  – масса стаканчика с крышкой и навеской после высушивания, г.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сорбционный процесс в динамических условиях заключается в фильтровании сточных вод через слой сорбента. Такой способ имеет большие технологические, эксплуатационные и экономические преимущества перед сорбцией в статических условиях. Сорбция в динамических условиях позволяет более полно использовать емкость сорбционного материала [28]. Поэтому исследования характеристик и свойств сорбентов осуществлялось как в динамических, так и в статических условиях. В статических условиях сорбент добавляли в раствор фенола или 2,4-дихлорфенола известного объема, и перемешивали с помощью магнитной мешалки.

Первоначальным этапом исследований являлось построение изотермы адсорбции по методу БЭТ. С помощью прибора для измерения удельной поверхности методом низкотемпературной адсорбции инертного газа-Sorbi- MS были построены изотермы адсорбции/десорбции жидкого азота на поверхности диатомита (рис. 10). В результате, анализ по методу БЭТ показал, что удельная поверхность сорбента достаточно низка, и составляет всего лишь  $8,1 \text{ м}^2/\text{г}$ . Объем мезопор составил  $0,016 \text{ см}^3/\text{г}$ , что также невелико по сравнению с активированными углями. Однако прошлые исследования показали невозможность использования активированных углей в реакторе ДБР из-за их углеродного состава.



**Рис. 10. Изотерма адсорбции/десорбции диатомита (метод БЭТ)**

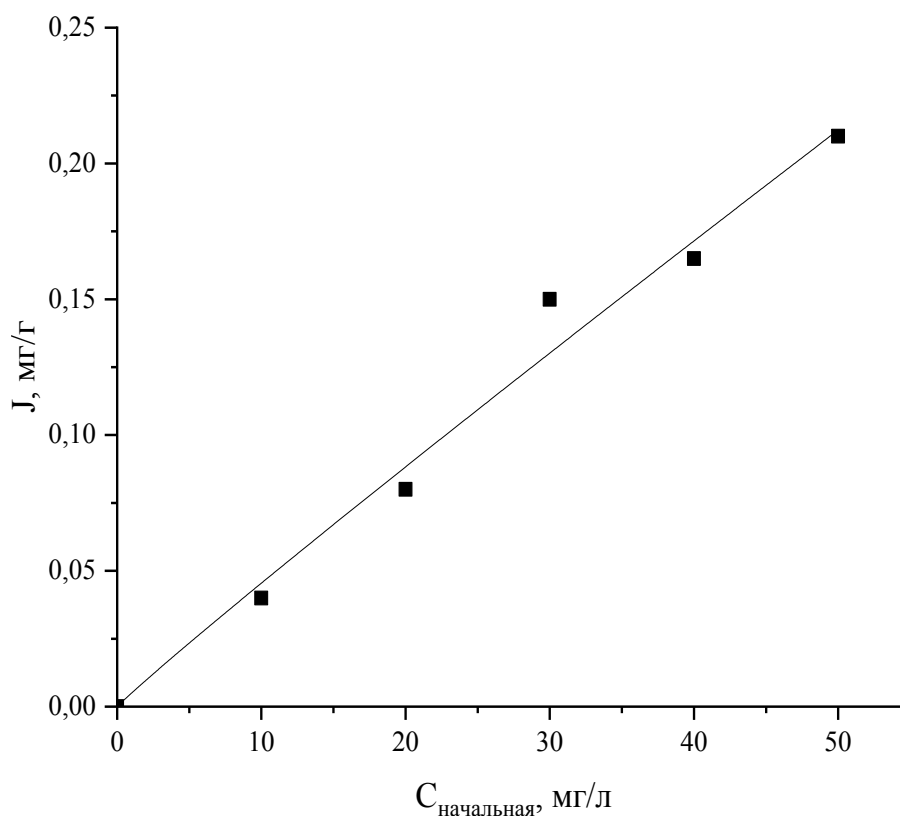
В (табл. 4.) представлены результаты по определению водопоглощения и влагосодержания сорбента. Результаты исследований показали, что сорбент является гидрофобным, т.к. практически не поглощал воду (водопоглощение  $1,63 \text{ г/г}$ ). Насыпная плотность сорбента составляет  $420 \text{ кг/м}^3$ .

## Определение водопоглощения и влагосодержания адсорбентов

Название сорбента	Влагосодержание, %	Водопоглощение, г/г
СМД-Сорб	0,06	1,63

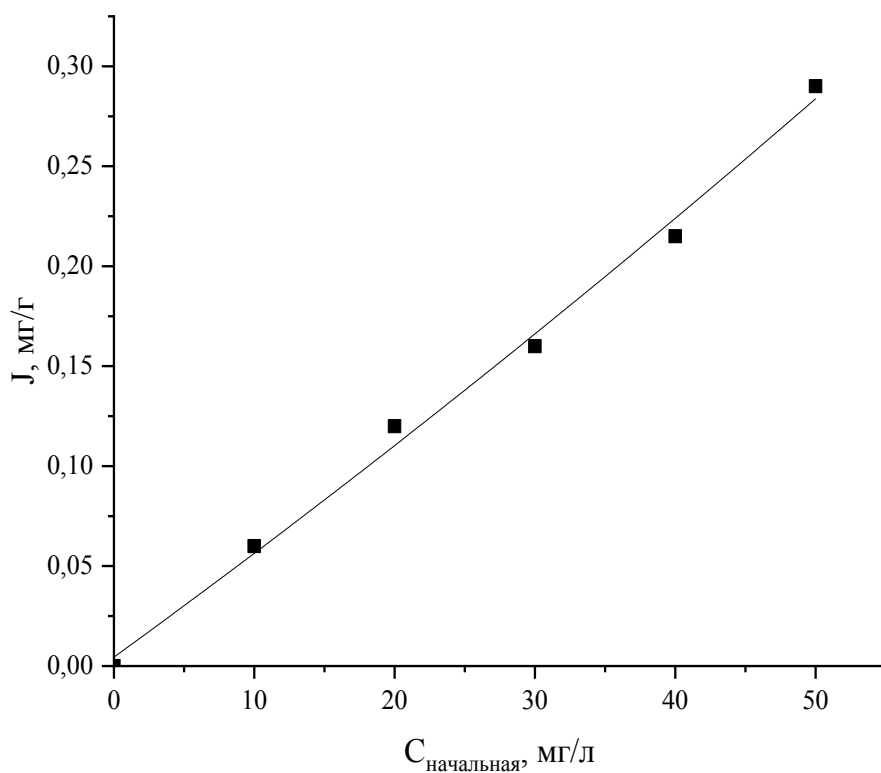
Таким образом, можно сделать вывод, что сорбент подходит для очистки в воды от органических соединений по показателям водопоглощения и влагосодержания, а его насыпная плотность соответствует заявленной производителем.

На рисунках 11 и 12 представлены результаты по определению адсорбционной емкости сорбента диатомита по фенолу и 2,4-дихлорфенолу, соответственно. Как видно из графиков, максимальная адсорбционная емкость фенола составляет порядка 0,25 мг/г, тогда как сорбционная емкость 2,4-дихлорфенола 0,17 мг/г. Возможно, снижение адсорбционной способности связано с наличием у 2,4-дихлорфенола двух атомов хлора в молекуле. Изучение деструкции веществ с поверхности адсорбента в плазме ДБР показало, что они разрушаются с высокой эффективностью, достигающей порядка 85 - 90 % при условиях проведения эксперимента, представленных в таблице 3.



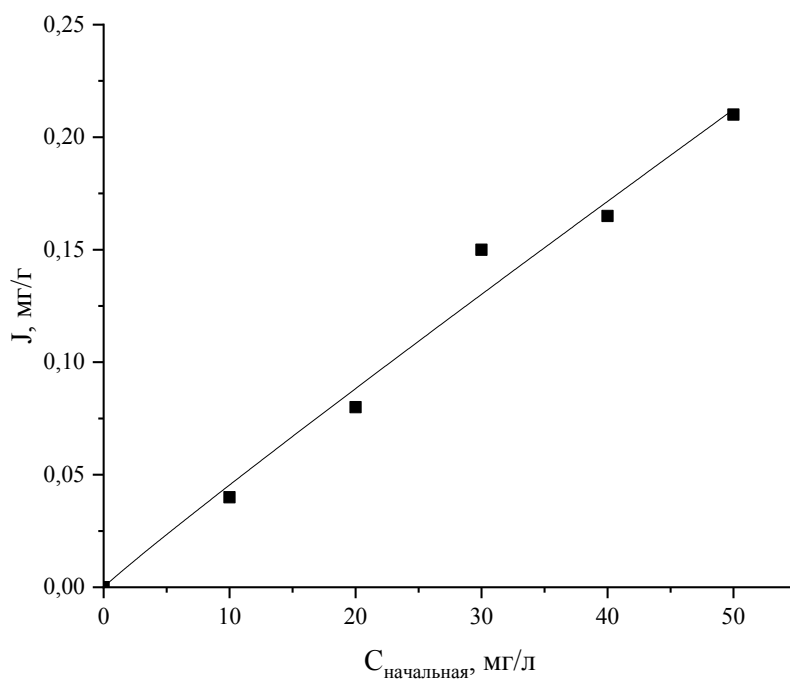
**Рис. 11. Адсорбционная ёмкость сорбента по 2,4-дихлорфенолу**

**в динамических условиях**



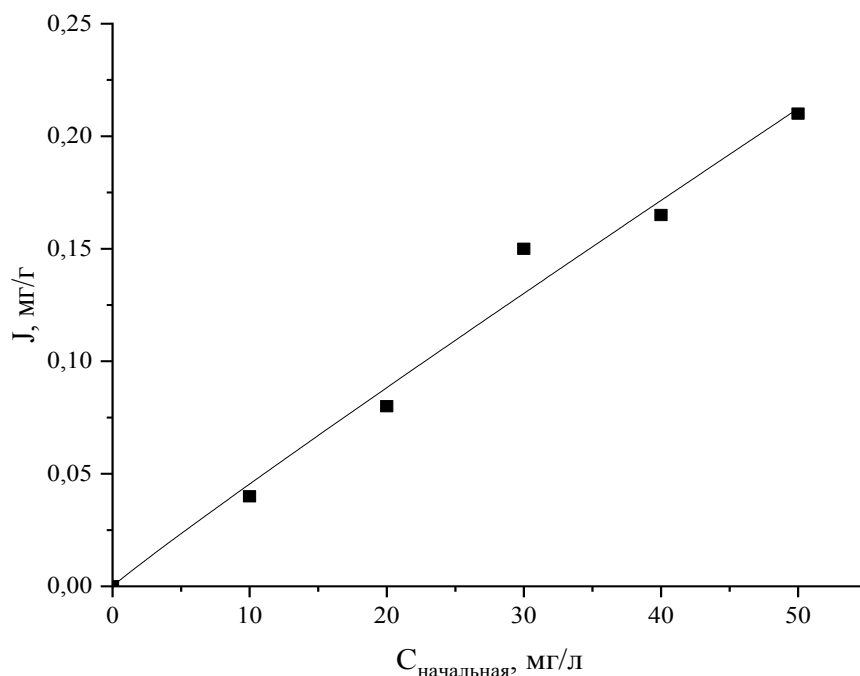
**Рис. 12. Адсорбционная ёмкость сорбента по фенолу в динамических условиях**

На рисунках 13 и 14 представлены результаты по определению статической сорбционной емкости 2,4-дихлорфенола и фенола соответственно.



**Рис. 13. Адсорбционная ёмкость сорбента по 2,4-дихлорфенолу в статических условиях**

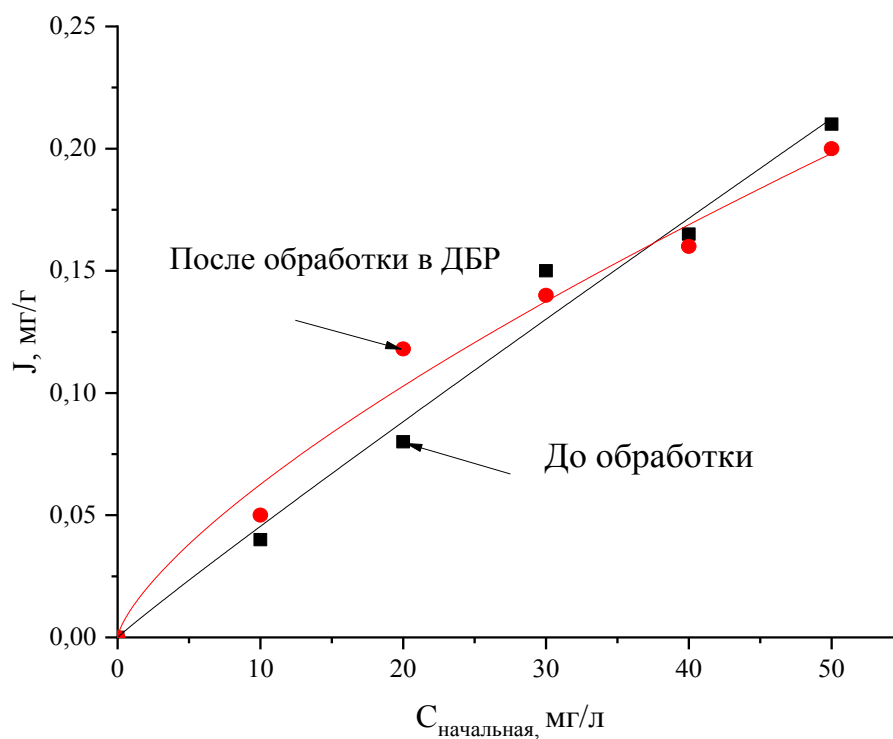
Сравнение статической и динамической сорбционной ёмкости показало, что статическая ёмкость незначительно выше при адсорбции, как фенола, так и 2,4-ДХФ. Это, вероятно, связано с временем протекания адсорбции, которое при пропускании раствора через адсорбционный слой в динамических условиях намного меньше, чем при адсорбции в статических условиях. Таким образом, можно предположить, что при сорбции в динамических условиях не успевает установиться адсорбционное равновесие.



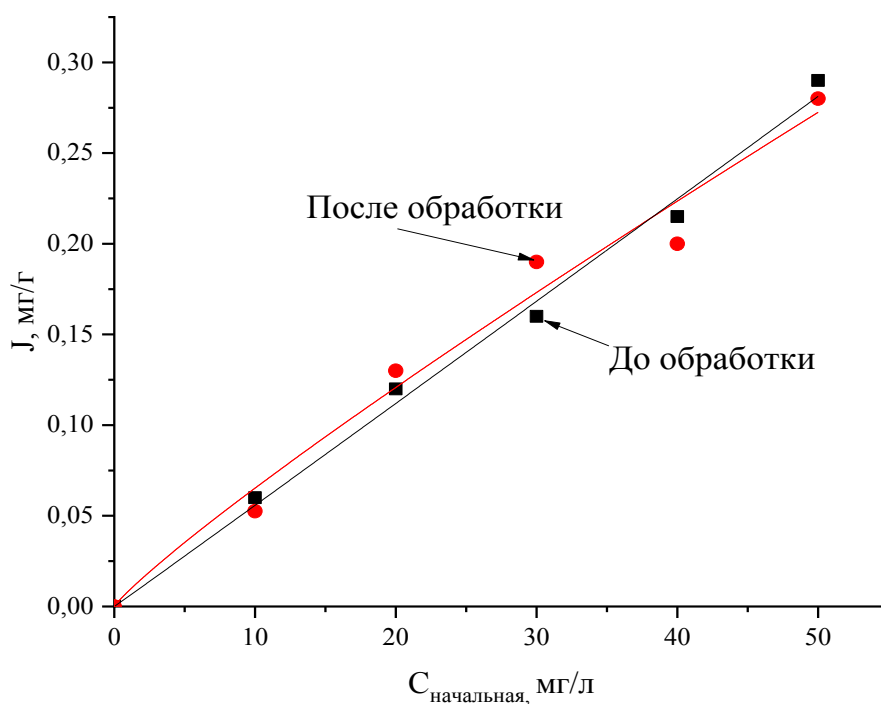
**Рис. 14. Адсорбционная ёмкость сорбента по фенолу в статических условиях**

Главным этапом исследовательской работы стало определение возможности повторного использования адсорбента после обработки его в плазме диэлектрического барьерного разряда. Для этого загрязненный сорбент помещали в реактор ДБР изображенный на (рис. 3) и обрабатывали в плазме кислорода, которая генерировалась при параметрах, представленных в таблице 3. Как видно из (рис. 15) и (рис. 16), при обработке загрязненного сорбента в плазме ДБР, его сорбционные свойства оставались практически неизменными, что говорит о возможности регенерации сорбента и возвращении его в технологические процессы водоочистки и водоподготовки.

Эколого-экономическая эффективность при протекании процесса состоит в том, что при деструкции загрязнителя с поверхности адсорбента, его можно восстановить, при этом удаляя загрязнитель, и не получая при деструкции вторичных загрязнителей окружающей среды. В дальнейшем исследование будет направлено на регенерацию дорогостоящих катализаторов и адсорбентов и варьирование параметров обработки для получения наилучшей технико-экономической эффективности при регенерации и модификации поверхности в плазме.



**Рис. 15. Изучение изменения сорбционной ёмкости сорбента, загрязнённого фенолом, после обработки в ДБР**



**Рис. 15. Изучение изменения сорбционной ёмкости сорбента, загрязнённого 2,4дихлорфенолом, после обработки в ДБР**

Для оценки удельных энергетических затрат (G) на полную регенерацию сорбента, загрязненного фенолом, либо 2,4-дихлорфенолом, были использованы данные, полученные в ходе экспериментов.

$$G = (U \cdot I \cdot t) / m = (6,5 \cdot 4,9 \cdot 60) / 0,008 = 238,875 \text{ кДж/кг},$$

где

U - напряжение, подводимое к реактору ДБР, кВ (6,5 кВ);

I - ток разряда, мА (4,9 мА);

m - максимальная масса регенерируемого сорбента, кг (0,008 кг);

t - время обработки сорбента, с (60 с).

Это в 1,8 и 81 раз ниже, чем энергетические затраты на регенерацию сорбентов в СВЧ-камере (437 кДж/кг) и в электрической печи (19367 кДж/кг), соответственно [8]. Максимальное число циклов регенерации, при которых адсорбент не теряет своих адсорбционных свойств составляет 8 циклов, что подтверждает данные, полученные ранее [29].

## ВЫВОДЫ

- 1) Изучение адсорбционной ёмкости диатомита по фенолу и 2,4-дихлорфенолу показало, что оба вещества плохо сорбируются на поверхность сорбента; максимальная сорбционная ёмкость для фенола составила примерно 0,3 мг/г, а для 2,4-ДХФ 0,24 мг/г.
- 2) Анализ по методу БЭТ показал, что удельная поверхность сорбента достаточно низка, и составляет всего лишь 8,1 м<sup>2</sup>/г. Объем мезопор составил 0,016 см<sup>3</sup>/г, что также невелико по сравнению с активированными углями.
- 3) Сравнение статической и динамической сорбционной ёмкости показало, что статическая ёмкость незначительно выше при адсорбции, как фенола, так и 2,4-ДХФ.
- 4) При обработке загрязненного диатомита в ДБР происходит регенерация его сорбционных свойств. Сорбционная ёмкость восстановленного сорбента, как загрязненного 2,4-ДХФ, так и фенолом практически не отличается от исходной.
- 5) Удельные энергетические затраты на полную регенерацию сорбента, загрязненного фенолом составляют 238,875 кДж/кг, что в 1,8 и 81 раз ниже, чем энергетические затраты на регенерацию сорбентов в СВЧ-камере (437 кДж/кг) и в электрической печи (19367 кДж/кг), соответственно. Таким образом, даже лабораторная экспериментальная установка является эколого-экономически эффективной при регенерации сорбентов, загрязненных фенолом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович, В.Т. Физическая химия барьерного разряда / В.Т. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. - М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.
2. Котельников, И. А. Лекции по физике плазмы: учеб. пособие / И. А. Котельников, Г. В. Ступков. – Новосиб. ун-т, Новосибирск, 1996. – 136 с.
3. Мешалкин, В.П. Методы химии высоких энергий в защите окружающей природной среды / В.П. Мешалкин, О.И. Койфман, В.И. Гриневич и др. – М.: Химия, 2008. – 244 с.
4. Lu, Na Application of Double-Dielectric Barrier Discharge Plasma for Removal of Pentachlorophenol from Wastewater Coupling with Activated Carbon Adsorption and Simultaneous Regeneration / Na Lu, Jie Li, Xingxing Wang and others // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2012. – V. 32. - №1. - P. 109 – 121
5. Гусев Г.И., Гуцин А.А., Гриневич В.И., Филиппов Д.В., Извекова Т.В. Физико-химические свойства сорбентов, используемых в очистке воды от нефтепродуктов. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. Вып. 7. С. 136-142
6. Hallaj, T. Determination of 2, 4-dichlorophenol in water samples using a chemiluminescence system consisting of graphene quantum dots, rhodamine B and cerium (IV) ion / T. Hallaj, M. Amjadi // Microchimica Acta. – 2016. – Vol. 183. – №. 3. – P. 1219-1225
7. Каменщиков, Ф.А., Богомольный, Е.И. Нефтяные сорбенты. М.– Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 268 с.
8. Собгайда, А.А. Сорбционные материалы для очистки сточных и природных вод от нефтепродуктов / А.А. Собгайда // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2011. – №. 52. – С. 120 – 124.
9. Щепакин, М.Б. Эколого-технологический комплекс для очистки гидросферы от нефти и нефтепродуктов / М.Б. Щепакин, И.Г. Гафаров, Г.М. Мишулин // Экология и промышленность России. – 2000. – Ноябрь. – С. 40 – 44.
10. Фасхутдинова, З.Т., Шайхиев, И.Г., Абдуллин, И.Ш., Вестник Казанского технологического университета, 17, 21, 220-222, (2014).
11. Шайхиев, И.Г., Фасхутдинова, З.Т., Абдуллин, И.Ш., Свергузова, С.В., Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 1, 133-137 (2013).
12. Шайхиев, И.Г., Фазуллина, З.Т., Абдуллин, И.Ш., Гафаров, И.Г., Вестник Казанского технологического университета, 19, 42-48 (2011).
13. Трушков С.М., Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Абдуллин И.Ш., Экспозиция Нефть Газ, 2, 56-59 (2012).
14. Кондаленко, О.А., Степанова, С.В., Шайхиев, И.Г. Международный научно-исследовательский журнал, 31 (10), 41-42 (2013).
15. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Доможиров В.В., Абдуллин И.Ш. Вестник Казанского технологического университета, 12, 110-117, (2011).

16. Шайхиев, И.Г., Степанова, С.В., Трушков, С.М., Абдуллин, И.Ш. Вестник Казанского технологического университета, 13, 129-135 (2011).
17. Шайхиев, И.Г., Низамов, Р.Х., Степанова, С.В., Фридланд, С.В. Вестник Башкирского университета, 15, 2, 304-306 (2010).
18. Кондаленко, О.А., Шайхиев, И.Г., Трушков, С.М. Экспозиция Нефть Газ, 5, 46-50 (2010).
19. Собгайда, Н.А., Ольшанская, Л.Н., Макарова, Ю.А. Химическое и нефтегазовое машиностроение, 3, 37 – 41 (2010).
20. Собгайда, Н.А., Ольшанская, Л.Н., Кутукова, К.Н., Макарова, Ю.А. Экология и промышленность России, 1, 36-38 (2009).
21. Собгайда, Н.А., Данилова, Е.А. Экология и промышленность России, 2, 18 – 20 (2005).
22. Chuah L.A., Shean T., Choong Y., Ngaini Z., Nourouzi M.M. Separation and Purification Technology, 113, 51–63 (2013).
23. Шайхиев, И.Г. Все материалы. Энциклопедический справочник, 12, 29-42 (2008).
24. Cambiella, Á., Ortea, E., Ríos, G., Benito, J.M., Pazos, C., Coca, J. Journal of Hazardous Materials, 131, 1–3, 17, 195–199 (2006).
25. Karagöz, S., Bhaskar, T., Muto, A., Sakata, Y., Fuel, 84, 7– 8, 875–884 (2005).
26. Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F.A., PérezVillarejo, L., Iglesias-Godino, F.J. Construction and Building Materials, 34, 275–284 (2012).
27. Abdullah, M.A., Anisa Ur Rahmah, Man, Z., Journal of Hazardous Materials, 177, 1–3, 683–691 (2010).
28. Лихачев Н. И., Ларин И. И., Хаскин С. А. Канализация населенных мест и промышленных предприятий (справочник проектировщика). Стройиздат, Москва, 1981. – 639 с.
29. Gusev, G. I., Gushchin, A. A., Grinevich, V. I., Osti, A. A., Izvekova, T. V., & Kvitkova, E. Y. (2017). Regeneration of natural sorbents contaminated with oil products in dielectric barrier discharge plasma. Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология», 60(6), 72-76.