

DOI 10.22363/2313-2310-2019-27-4-264-274
УДК 628.1:628.34

Научная статья

Влияние температуры обжига отхода водоочистки на сорбционные характеристики по нефтепродуктам

И.Г. Шайхиев¹, И.Н. Шумкова¹, С.В. Свергузова², Ж.А. Сапронова²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет
Российская Федерация, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68

²Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова
Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

Аннотация. В статье отражены результаты исследования влияния температуры обжига отхода водоочистки, образующегося в результате получения питьевой воды на станции очистки в Нижнекамске (Республика Татарстан), на сорбционные характеристики по нативным и отработанным нефтепродуктам – маслам марок 5W40, 15W40 и И-20А. Представлены методики инструментальных и расчетных способов проведенных исследований. Проведен дифференциальной термический анализ и дифференциально-сканирующая калориметрия отхода водоочистки; построены графики зависимости влияния температуры обжига на изменение рН водной вытяжки и величину максимальной маслосемкости и водопоглощения. Установлено, что при высоких температурах происходит разложение органических соединений с образованием технического углерода, способствующего увеличению максимальной маслосемкости в динамических и статических условиях и водопоглощения. Определено, что наилучшие адсорбционные показатели достигаются для образца отхода водоочистки, подвергнутого термообработке при 600 °С.

Ключевые слова: отход водоочистки, термическая модификация, маслосемкость, водопоглощение

Введение

В настоящее время проблема загрязнения гидросферы органическими токсикантами, такими как нефть и нефтепродукты (НП), выросла до мировых масштабов [1]. Большое количество органических веществ попадает в природные воды в результате некачественной очистки сточных вод (СВ) промышленными предприятиями, так как качественная очистка стоков требует больших материальных и финансовых затрат. Бывают случаи, когда СВ сбрасываются в природные водоемы без какой-либо предварительной очистки [2]. Такое «решение» проблемы наносит окружающей среде негативное воздействие, приводящее к необратимым последствиям.

Эффективным и широко применяемым способом очистки природных и СВ от нефти и НП является адсорбционный [3–6], единственный недостаток

которого – дороговизна некоторых высокоэффективных сорбентов, например активированных углей.

Выходом из создавшегося положение может служить использование в качестве сорбционных материалов (СМ) отходов промышленного и сельскохозяйственного производства [7]. В частности, в литературных источниках описано использование в качестве СМ для извлечения нефти и НП из водных сред отхода водоподготовки, образующегося при умягчении речной воды на ТЭЦ [8–14].

В связи с вышеизложенным проводились исследования отхода от водоочистки речной воды для получения питьевой воды в Нижнекамске (Республика Татарстан) в качестве СМ для удаления НП из водных сред. Следует отметить, что исследуемый отход водоочистки принципиально отличается от отходов водоподготовки ТЭЦ, так как он образован в результате химической очистки речной воды с использованием коагулянтов и флокулянтов и доочисткой на угольных и песчаных фильтрах. Отход водоподготовки образуется при использовании известкового молока и других технологических приемах при умягчении воды на ТЭЦ.

Объект и методы исследований

В качестве объекта исследования использовался отход водоочистки (ОВ), образующийся в результате подготовки питьевой воды для населения Нижнекамска, состоящий из оксидов алюминия (преимущественно), кремния, кальция и их комплексов, а также карбоната кальция и органических соединений. Перед проведением исследований ОВ предварительно помещался в сушильный шкаф на 8 ч при температуре 110 °С, а затем измельчался. Для проведения экспериментов использовалась фракция размерами 0,5–1,5 мм.

Термическая модификация проводилась путем прокаливании ОВ в муфельной печи при в течение 1 ч при температурах от 300 до 600 °С с шагом 50 °С.

Для определения максимальной маслосемкости в статических условиях в чашку Петри заливался исследуемый НП и помещалась латунная сеточка с размером ячеек 0,5 мм. Затем на поверхность НП насыпался 1 г СМ. Через определенные промежутки времени после начала опыта сеточка извлекалась вместе с СМ, насыщенным НП. После стекания избыточного количества последнего образец взвешивался на весах. Масса адсорбированного НП вычислялась по формуле:

$$a = \frac{m_{\text{погл}}}{m_{\text{сорб}}},$$

где $m_{\text{погл}}$ – масса поглощенного НП, г; $m_{\text{сорб}}$ – масса СМ, г; a – маслосемкость, г/г.

В качестве сорбатов использовались чистые и отработанные масла марок И-20А, 5W40 и 15W40.

Значение максимальной маслосемкости в динамических условиях определялось следующим образом: в стеклянную колонку загружалось 3 г образца СМ, через который пропусклось 6 г масла с расходом 1 капля в секунду.

Весовым методом определялась масса прошедшего через слой СМ НП, по разнице масс – количество поглощенного масла.

Определение влагопоглощения проводилось аналогично способу определения максимальной маслосъемкости в статических условиях, только вместо масла в чашки Петри заливалась вода.

Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) и термогравиметрический анализ (ТГА) проводились на приборе марки NETZSCH STA 499 F1 в интервале температур 20–1000 °С при скорости нагрева 25 °С/мин.

Результаты и обсуждение

Определен состав исследуемого ОВ. Установлено, что основными неорганическими компонентами данного отхода являются кварц (SiO_2), сепиолит ($\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{11}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$), кальцит (CaCO_3), каолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и анортит ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Первоначально определялась максимальная маслосъемкость исследуемого ОВ по НП в статических и динамических условиях (табл. 1).

Таблица 1

Значения максимальной маслосъемкости исходного отхода водоочистки в статических и динамических условиях

| Условия проведения эксперимента | Значения максимальной маслосъемкости, г/г | | |
|---------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| | 5W40 _{чист/отраб} | 15W40 _{чист/отраб} | И-20 _{чист/отраб} |
| Статические условия | 1,55/1,50 | 1,49/1,46 | 1,52/1,49 |
| Динамические условия | 0,50/0,65 | 0,47/0,56 | 0,43/0,46 |

Table 1

Values of the maximum oil absorption of the initial waste of water treatment in static and dynamic conditions

| Experiment's conditions | Values of the maximum oil absorption, g/g | | |
|-------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| | 5W40 _{clean/used} | 15W40 _{clean/used} | И-20 _{clean/used} |
| Static conditions | 1,55/1,50 | 1,49/1,46 | 1,52/1,49 |
| Dynamic conditions | 0,50/0,65 | 0,47/0,56 | 0,43/0,46 |

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, максимальная сорбционная емкость ОВ по исследуемым сорбатам в статических условиях не превышает 1,55 г/г, причем для чистых НП данный показатель выше такового для отработанных масел. Значения максимальной маслосъемкости в динамических условиях примерно в 3 раза ниже этого же показателя, определенно в статических условиях.

Для увеличения сорбционных характеристик СМ применяют различные методы – тепловую обработку, химическую и физико-химическую модификации. Для СМ, являющихся отходами производств и содержащих в своем составе органические и неорганические компоненты, перспективна термическая обработка. Так, ранее нами было показано, что термообработка сатурационного осадка, образующегося в сахарном производстве при температуре 600 °С, повышает сорбционные показатели по многим поллютантам [15; 16].

В связи с вышеизложенным для определения температурного интервала, при котором происходит наибольшее изменение масс и тепловых эффектов, проводились термическое воздействие на ОВ. Графики ДСК и ТГА представлены на рис. 1.

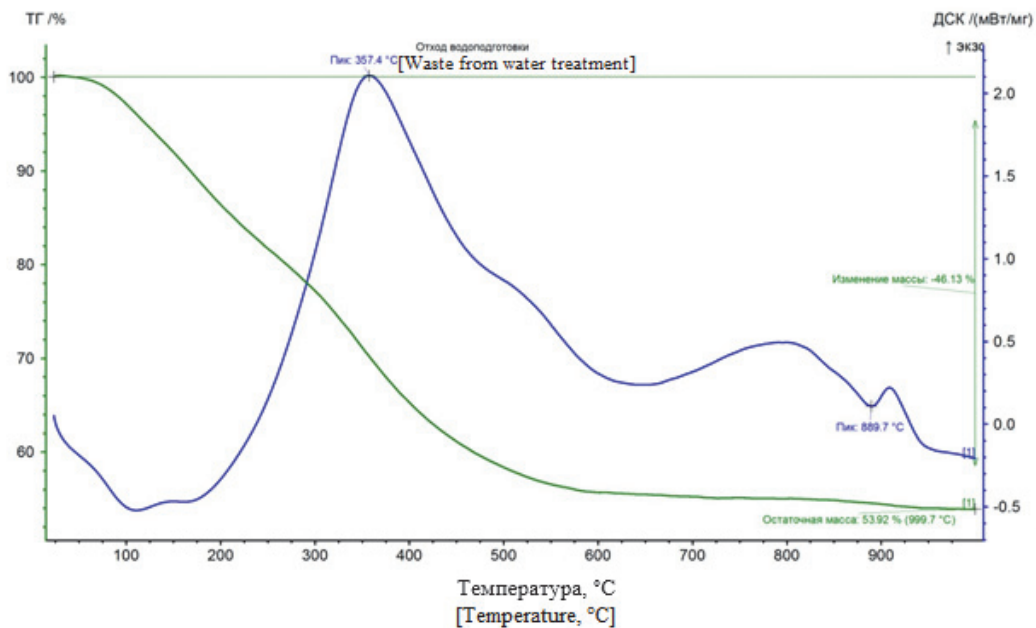


Рис. 1. Дифференциальный термический анализ отхода водоочистки
[Figure 1. Differential thermal analysis of waste from water treatment]

По кривой ТГА видно, что масса исследуемого образца ОВ интенсивно снижается при увеличении температуры нагрева до 600 °С, дальнейшее увеличение температуры нагрева не приводит к значительному изменению массы. Данное обстоятельство объясняется разложением органической составляющей, входящей в состав ОВ. Остаточная масса (зольность) исследуемого образца составляет 53,92 %, соответственно, содержание влаги и органических веществ в исследуемом ОВ составляет 46,08 %.

Для получения термически модифицированных образцов отхода водоочистки (ТМОВ) исходный ОВ подвергался обжигу в муфельной печи при температуре от 300 до 600 °С с интервалом в 50 °С в течение 1 ч.

В результате обжига отмечается незначительное изменение окраски и уменьшение насыпной плотности образцов ТМОВ. Найдено, что ОВ, подвергнутый температурному воздействию при 100 °С, имеет насыпную плотность 0,97 г/см³, при 600 °С – 0,63 г/см³. ТМОВ, полученные при температурах более 400 °С, имеют черную окраску, обусловленную образованием углерода в процессе разложения органической составляющей ОВ.

рН среды – один из важнейших факторов, оказывающих влияние на эффективность очистки. В этой связи проводились исследования влияния массы ТМОВ и условий термообработки на значения рН водных вытяжек (рис. 2).

Как следует из приведенных на рис. 2 графических зависимостей, с увеличением массы ТМОВ в 100 см³ дистиллированной воды значения рН вод-

ных вытяжек увеличиваются. Данное обстоятельство, по всей видимости, обусловлено разложением кальцита и частичной диссоциацией продуктов разложения в водную среду.

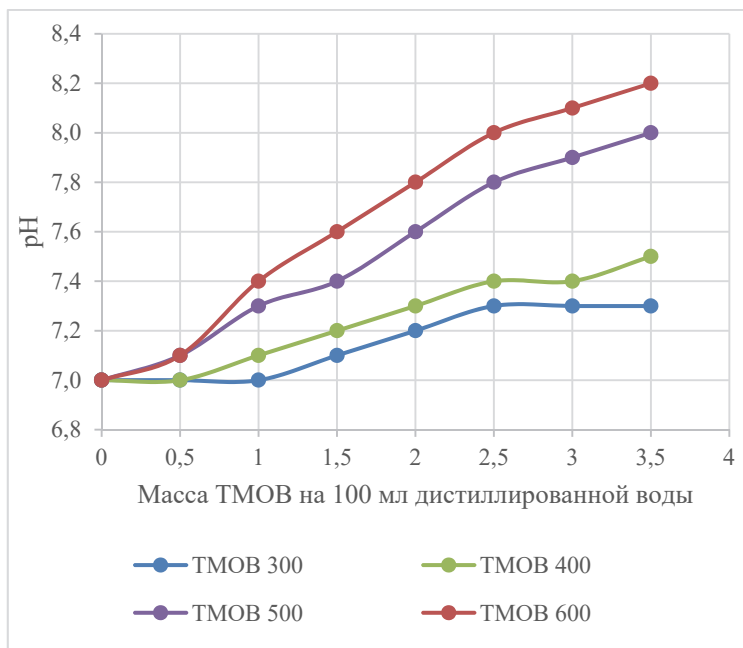


Рис. 2. Зависимость pH водной вытяжки от массы ТМОВ

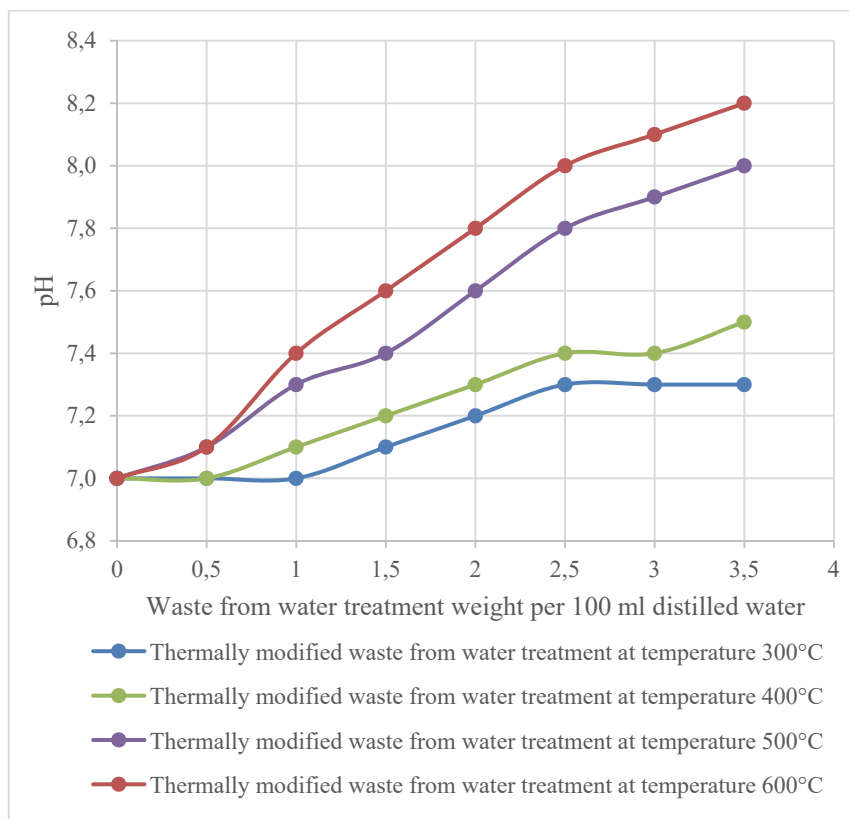
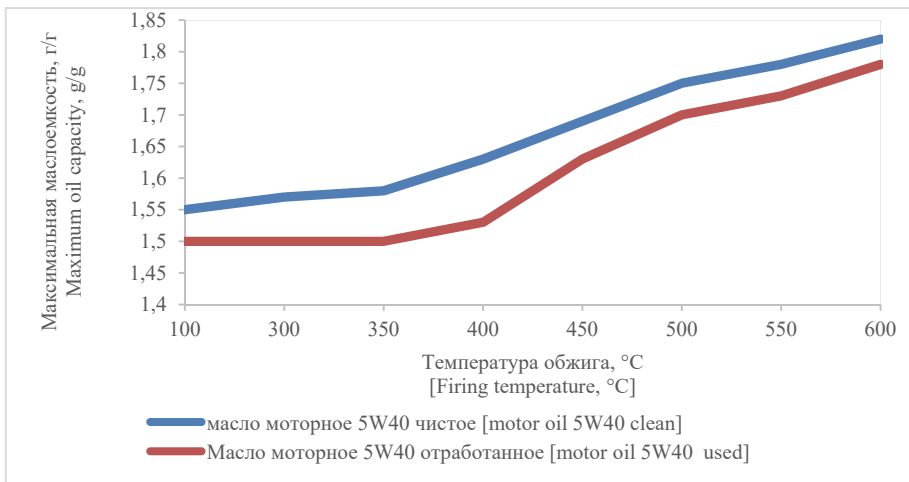
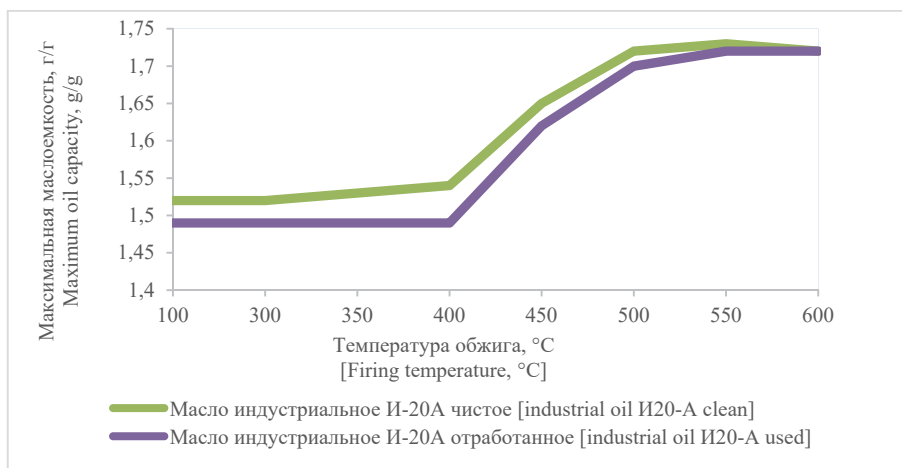


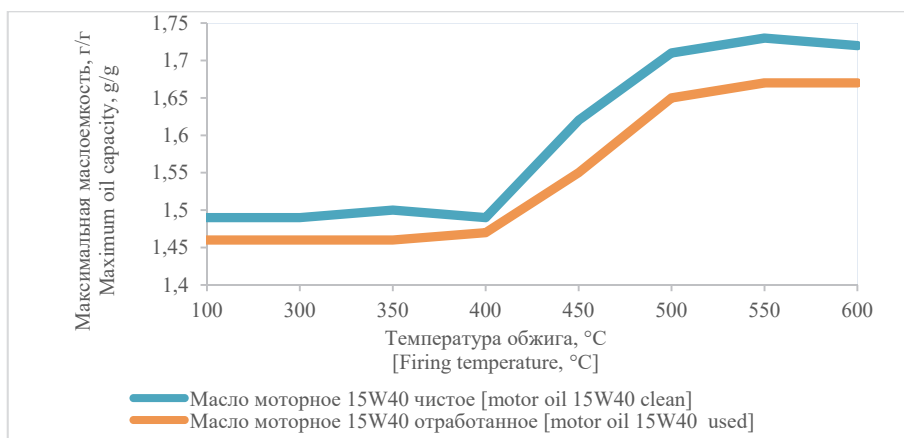
Figure 2. pH dependence of aqueous extract on the mass of thermally modified waste from water treatment



а



б



в

Рис. 3. Зависимость изменения максимальной маслосъемкости от температуры обжига ОВ при контактировании с:
 а – маслом моторным 5W40 (чистым и отработанным);
 б – маслом индустриальным И20-А (чистым и отработанным);
 в – маслом моторным 15W40 (чистым и отработанным)

[Figure 3. The dependence of the maximum oil capacity of the firing temperature of the waste from water treatment in contact with:

a – motor oil 5W40 (clean and used); б – industrial oil И20-А (clean and used); в – motor oil 15W40 (clean and used)]

Далее определялось влияние температуры обжига ОВ на значения максимальной маслосоемкости в статических условиях. По полученным результатам построены графики зависимости максимальной маслосоемкости от температуры обжига отхода (рис. 3).

Как следует из графических зависимостей, приведенных на рис. 3, значения максимальной маслосоемкости образцов ТМОВ резко увеличиваются для образцов, подвергнутых термическому воздействию при температурах более 400 °С. Данное обстоятельство, как указывалось ранее, связано с наличием в составе СМ углерода, образованного в результате термообработки органической составляющей ОВ. Наибольшие значения маслосоемкости наблюдаются для образца ТМОВ₆₀₀.

Значения максимальной маслосоемкости, определенные в динамических условиях, с увеличением температуры обжига ОВ также увеличиваются. Среднее изменение результатов между ОВ и ТМОВ₆₀₀ составляет 28 %. Наибольшее значение маслосоемкости наблюдается для масла 5W40_{чист} – 0,77 г/г (табл. 4).

Таблица 2

Максимальные значения маслосоемкости в динамических условиях

| | Максимальная маслосоемкость, г/г | | | | | |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | 5W40 _{чист} | 5W40 _{отраб} | И20-А _{чист} | И20-А _{отраб} | 10W40 _{чист} | 10W40 _{отраб} |
| ОВ | 0,50 | 0,65 | 0,43 | 0,46 | 0,47 | 0,56 |
| ТМОВ ₆₀₀ | 0,77 | 0,67 | 0,68 | 0,73 | 0,69 | 0,74 |
| Изменение результатов, % | 36 | 3 | 37 | 37 | 32 | 24 |

Table2

The maximum values of oil absorption in dynamics

| | Maximum values of oil absorption, g/g | | | | | |
|---|---------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | 5W40 _{clean} | 5W40 _{used} | И20-А _{clean} | И20-А _{used} | 15W40 _{clean} | 15W40 _{used} |
| Original waste from water treatment | 0,50 | 0,65 | 0,43 | 0,46 | 0,47 | 0,56 |
| Thermally modified waste from water treatment at temperature 600 °C | 0,42 | 0,44 | 0,36 | 0,37 | 0,57 | 0,49 |
| Override the results, % | 36 | 3 | 37 | 37 | 32 | 24 |

Заключение

Исследовано влияние температуры обжига ОВ на способность адсорбировать нефтепродукты. Установлено, что с увеличением температуры модификации максимальная маслосоемкость в статических и динамических условиях увеличивается.

Максимальное значение маслосоемкости наблюдается при температуре обжига ОВ 600 °С при использовании в качестве сорбата масла 5W40_{чист} –

1,82 г/г., а минимальное при этой же температуре у масла 15W40_{отраб} – 1,67 г/г; максимальное водопоглощение ТМОВ₆₀₀ составляет 2,05 г/г.

Температуры обжига ОВ также оказывает влияние на рН водной вытяжки при увеличении массы исследуемого вещества на 100 см³ – происходит окисление среды.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ имени В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий имени В.Г. Шухова.

Список литературы

- [1] *Пиковский Ю.И.* Природные и техногенные потоки углеводов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 206 с.
- [2] *Мухутдинов А.А., Борознов Н.И., Петров Б.Г., Мухутдинова Т.З., Шаяхметов Д.К.* Основы и менеджмент промышленной экологии. Казань: Магариф, 1998. 404 с.
- [3] *Собгайда Н.А.* Сорбционные материалы для очистки сточных и природных вод от нефтепродуктов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2011. Вып. 52. С. 120–125.
- [4] *Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н.* Сорбенты для очистки вод от нефтепродуктов. Саратов: СГТУ, 2010. 107с.
- [5] *Сироткина Е.Е., Новоселова Л.Ю.* Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. С. 359–377.
- [6] *Привалова Н.М., Двадненко М.В., Некрасова А.А., Попова О.С., Привалов Д.М.* Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью природных и искусственных сорбентов // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 113 (09). С. 297–306.
- [7] *Bhatnagar A., Sillanpää M.* Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: a review // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 157. Pp. 277–296.
- [8] *Николаева Л.А., Бородай Е.Н.* Ресурсосберегающая технология утилизации шлама водоподготовки на ТЭС: монография. Казань: КГЭУ, 2012. 110 с.
- [9] *Николаева Л.А., Хамзина Д.Л.* Очистка водных источников от нефтяных загрязнений гидрофобным карбонатным шламом // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 92–100.
- [10] *Бородай Е.Н., Николаева Л.А., Голубчиков М.А.* Сорбционные свойства шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2011. № 1–2. С. 132–137.
- [11] *Николаева Л.А., Исхакова Р.Я.* Очистка оборотных и сточных вод ТЭС от нефтепродуктов модифицированным шламом водоподготовки // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 72–78.
- [12] *Николаева Л.А., Голубчиков М.А.* Влияние природы гидрофобизатора на сорбционную емкость шлама осветлителей ТЭЦ // Вода: химия и экология. 2011. № 10. С. 54–57.
- [13] *Николаева Л.А., Голубчиков М.А.* Повышение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 3–4. С. 112–116.
- [14] *Николаева Л.А., Бородай Е.Н., Голубчиков М.А.* Изучение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 1–2. С. 132–136.
- [15] *Ельников Д.А., Свергузова Ж.А., Свергузова С.В.* Влияние температурной обработки дефеката на эффективность очистки модельных растворов от красителей // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 144–147.
- [16] *Лупандина Н.С., Сапронова Ж.А., Свергузова С.В.* Очистка водных сред от ионов Mn(VII) термически модифицированным отходом производства сахарозы // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 266–269.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 06.09.2019

Дата принятия к печати: 15.12.2019

Для цитирования:

Шайхиев И.Г., Шумкова И.Н., Свергузова С.В., Сапронова Ж.А. Влияние температуры обжига отхода водоочистки на сорбционные характеристики по нефтепродуктам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 4. С. 264–274. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-264-274>

Сведения об авторах:

Шайхиев Ильдар Гильманович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9160-0412>, eLIBRARY SPIN-код: 3547-6831. E-mail: ildars@inbox.ru

Шумкова Ирина Наилевна – соискатель кафедры инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7413-1973>, eLIBRARY SPIN-код: 7509-7448 E-mail: daminova-i@mail.ru

Свергузова Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3845-8741>, eLIBRARY SPIN-код: 1596-2118. E-mail: pe@intbel.ru

Сапронова Жанна Ануаровна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1410-0179>, eLIBRARY SPIN-код: 7817-4790. E-mail: sapronova.2016@yandex.ru

Research article

Effect of firing temperature waste from water treatment on sorption characteristics of petroleum products

**Ildar G. Shaikhiev¹, Irina N. Shumkova¹,
Svetlana V. Sverguzova², Zhanna A. Sapronova²**

¹Kazan National Research Technological University
68 Karl Marks St, Kazan, 420015, Russian Federation

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov
46 Kostyukov St, Belgorod, 308012, Russian Federation

Abstract. The article reflects the results of research on the influence of roast temperature of water treatment waste obtained from drinking water generation (at the water treatment plant in Nizhnekamsk, Republic of Tatarstan) for sorption characteristics for native and used oil products – oils 5W40, 15W40 and И-20А. The methods of instrumental and computational means of research are presented. Differential thermal analysis and differential scanning calorimetry of water treatment waste were performed. The graphs of the influence of roast tem-

perature on the aqueous extract pH value, maximum oil capacity and water absorption were constructed. It was found that at high temperatures, the decomposition of organic compounds with formation of carbon black occurs. It increases the maximum oil capacity in dynamic and static conditions in water and water absorption. It is determined that the best adsorption indicators are achieved for a sample of water treatment waste subjected to heat treatment at 600 °C.

Keywords: waste from water treatment, thermal modification, oil absorption, water absorption

Acknowledgments. The work was carried in framework of implementation of the Development Program for flagship university on the basis of Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov using equipment based on the V.G. Shoukhov Center for High Technologies.

References

- [1] Pikovsky YuI. *Natural and man-made hydrocarbon flows in the environment*. Moscow: Moscow State University Publ.; 1993.
- [2] Mukhutdinov AA, Boroznov NI, Petrov BG, Mukhutdinova TZ, Shayakhmetov DK. *Fundamentals and management of industrial ecology*. Kazan: Magarif Publ.; 1998.
- [3] Sobgayda HA. Sorption materials for wastewater and natural water treatment from petroleum products. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile University*. 2011;(52): 120–125.
- [4] Sobgayda NA, Olshanskaya LN. *Sorbents for water purification from oil products*. Saratov: SGTU Publ., 2010.
- [5] Sirotkina EE, Novoselova LYu. Materials for adsorption purification of water from oil and oil products. *Chemistry for sustainable development*. 2005;13:359–377.
- [6] Privalova NM, Dvadenko MV, Nekrasov AA, Popova OS, Privalov DM. *Treatment of oily wastewater with natural and artificial sorbents*. *Scientific Journal of KubGAU*. 2015;113(09):297–306.
- [7] Bhatnagar A, Sillanpää M. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2010;157:277–296.
- [8] Nikolaeva LA, Boroday EN. *Resource-saving technology for utilization of water treatment sludge at thermal power plants: Monograph*. Kazan: Kazan State Power Engineering University; 2012.
- [9] Nikolaeva LA, Khamzina DL. Purification of water sources from oil pollution by hydrophobic carbonate sludge. *Water: chemistry and ecology*. 2018;(4–6):92–100.
- [10] Boroday EN, Nikolaev LA, Golubchikov MA. Sorption properties of sludge clarifiers in wastewater treatment of power plants from petroleum products. *Proceedings of the universities. Energy problem*. 2011;(1–2):132–137.
- [11] Nikolaev LA, Iskhakova RI. Purification of recycling and waste waters of thermal power plants from oil modified helmet water. *Teploenergetika*. 2017;(6):72–78.
- [12] Nikolaev LA, Golubchikov MA. The influence of the nature of water repellent on the sorption capacity of the sludge clarifiers TPP. *Water: chemistry and ecology*. 2011;(10):54–57.
- [13] Nikolaev LA, Golubchikov MA. Increase of sorption properties of sludge clarifiers in wastewater treatment of power plants from petroleum products. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problem*. 2011;(3–4):112–116.
- [14] Nikolaeva LA, Boroday EN, Golubchikov MA. Study of sorption properties of sludge clarifiers in the treatment of waste water from TPP oil. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problem*. 2011;(1–2):132–136.

- [15] Elnikov DA, Sverguzova AJ, Vergasova SV. The influence of heat treatment of lime on the efficiency of purification of model solutions of dyes. *Bulletin BSTU name after V.G. Shoukhov*. 2011;(2):144–147.
- [16] Lupandina NS, Saponova JA, Vergasova SV. Purification of water from ions Mn(VII) thermally modified waste production of sucrose. *Bulletin of Technological University*. 2015;18(17):266–269.

Article history:

Received: 06.09.2019

Revised: 15.12.2019

For citation:

Shaikhiev IG, Shumkova IN, Sverguzova SV, Saponova ZhA. Effect of firing temperature waste from water treatment on sorption characteristics of petroleum products. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2019;27(4):264–274. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-264-274>

Bio notes:

Ildar G. Shaikhiev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9160-0412>, eLIBRARY SPIN-code: 3547-6831. E-mail: ildars@inbox.ru

Irina N. Shumkova – applicant, the Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7413-1973>, eLIBRARY SPIN-code: 7509-7448. E-mail: daminova-i@mail.ru

Svetlana V. Sverguzova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3845-8741>, eLIBRARY SPIN-code: 1596-2118. E-mail: pe@intbel.ru

Zhanna A. Saponova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1410-0179>, eLIBRARY SPIN-code: 7817-4790. E-mail: saponova.2016@yandex.ru