



Создание адсорбента на основе отработанного кизельгура для очистки воды от нефти

Е.Ю. Руденко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Известно, что отработанный кизельгур (диатомит, диатомовая земля), являющийся одним из основных отходов пивоваренного производства, можно использовать в качестве адсорбента для очистки воды от сырой нефти. Термическая и химическая модификация этого отхода пивоварения увеличивает его нефтеемкость. Целью проведенного исследования являлось получение сорбента для очистки воды от нефти на основе различных модификаций отработанного кизельгура. Предварительные исследования показали, что на процесс модификации отработанного диатомита влияют химическая природа и концентрация модифицирующего вещества, температура и продолжительность воздействия. Щелочная модификация отработанного кизельгура эффективнее, чем кислотная, наибольшее влияние на нефтеемкость оказывает модификация раствором гидроксида натрия. Максимальной нефтеемкостью обладает отработанный диатомит, модифицированный 1,5 М раствором гидроксида натрия при температуре 75 °С в течение 120 мин. Для оптимизации методики получения адсорбента, применяемого для очистки воды от нефти, на основании данных предварительных опытов с помощью системы статистического анализа Statistica 10.0 был построен полный факторный план эксперимента и проведены дополнительные опыты. Анализ карты Парето стандартизированных эффектов показал, что на процесс модификации отработанного кизельгура достоверно влияют концентрация модифицирующего реагента и температура проведения процесса модификации, поэтому для получения адсорбента, применяемого для очистки воды от нефти, наиболее оптимальной и эффективной является методика модификации 1,5 М раствором гидроксида натрия при температуре 75 °С в течение 30 мин.

Ключевые слова: вода, очистка, сорбция, нефтеемкость, отработанный кизельгур

Для цитирования: Руденко Е.Ю. Создание адсорбента на основе отработанного кизельгура для очистки воды от нефти // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 1. С. 104–111. DOI: 10.21285/achb.959. EDN: QDBVYR.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Creation of an adsorbent from spent diatomaceous earth tailored to purify water from oil

Elena Yu. Rudenko

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation

Abstract. It is known that spent diatomaceous earth (diatomite; kieselguhr), one of the main waste products from the beer filtration process, can be used as an adsorbent to purify water from crude oil. The thermal and chemical modification of this waste product increases its oil capacity. The conducted study was aimed at obtaining a sorbent tailored to purify water from oil using different modifications of spent diatomaceous earth. Preliminary studies revealed that the modification of spent diatomaceous earth is affected by the chemical nature and concentration of the modifying agent, as well as the temperature and duration of exposure. Alkaline modification of spent diatomaceous earth is more effective than acid modification; modification with sodium hydroxide solution produces the greatest effect on oil

capacity. The maximum oil capacity is exhibited by spent diatomaceous earth modified with 1.5 M sodium hydroxide solution at 75 °C for 120 min. In order to optimize the procedure for obtaining an adsorbent suitable for purifying water from oil, a full factorial design was implemented on the basis of preliminary experimental data using Statistica 10.0, and additional experiments were conducted. An analysis of Pareto charts of standardized effects revealed that the modification process of spent diatomaceous earth is significantly affected by the modifying reagent concentration and the modification process temperature. Therefore, modification with 1.5 M sodium hydroxide solution at 75 °C for 30 min is the most optimal and effective procedure for obtaining an adsorbent suitable for purifying water from oil.

Keywords: water, purification, sorption, oil capacity, spent diatomaceous earth

For citation: Rudenko E.Yu. Creation of an adsorbent from spent diatomaceous earth tailored to purify water from oil. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1):104-111. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.959. EDN: QDBVYR.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение масштабов промышленного производства и требований к качеству воды вызывает необходимость постоянного поиска более эффективных средств удаления различных загрязнений из природных и сточных вод. Нефтяное загрязнение отличается от других антропогенных влияний тем, что оно оказывает не постоянное, а так называемое залповое воздействие на окружающую среду, вызывая ее быструю ответную реакцию. Во всех мероприятиях, связанных с ликвидацией загрязнений и восстановлением экосистем, необходимо придерживаться главного принципа: не нанести экосистемам больший вред, чем тот, что уже вызвало загрязнение. Среди методов, успешно используемых для решения этой проблемы, одним из самых эффективных является очистка воды методом сорбции. Преимущества метода сорбции заключаются в возможности удаления загрязнений чрезвычайно разнообразной природы фактически до любой остаточной концентрации независимо от их химической стабильности, отсутствии вторичных загрязнений и возможности управления процессом очистки [1–3].

При сорбционной очистке воды происходит удерживание и связывание загрязняющего вещества на поверхности или в объеме твердого материала с развитой или специфической поверхностью, например с поверхностью активных углей. В качестве сорбентов вместо довольно дорого активированного угля предпочитают использовать большое количество природных минеральных и органических веществ и материалов [3], которые часто являются побочными продуктами и отходами различных видов хозяйственной деятельности человека. В настоящее время они создают большое количество проблем, связанных с утилизацией, из-за больших объемов образования, особенностей химического состава и физических свойств. Применение побочных продуктов и отходов позволит создать дешевые адсорбенты для очистки воды от различных загрязнений при разумных расходах на их производство и реализацию процесса удаления загрязняющих веществ.

Кизельгур, также известный как диатомит, диатомовая земля, широко применяют в пивоваренной промышленности для фильтрации готового пива. В последние годы в связи с быстрым развитием пивоварения количество кизельгуровых отходов значительно увеличилось [4–6]. Регенерация, переработка и утилизация отработанного кизельгура является серьезной экологической, санитарной и экономической проблемой во всем мире [1, 2]. Лишь небольшое количество отработанного кизельгура регенерируют [7] или повторно используют для производства текстиля [8] и строительных материалов – цемента [9],

бетона [9–11], кирпичей [12], уничтожения насекомых-вредителей злаковых и бобовых культур [13], удобрения почвы [14]. В настоящее время активно развивается новое направление утилизации отработанного кизельгура – создание адсорбентов для очистки природных и сточных вод от ионов тяжелых металлов [15, 16], нефти [17] и органических красителей [4, 18–21].

Цель проведенного исследования заключалась в разработке методики создания адсорбента для очистки воды от нефти на основе отработанного кизельгура.

К задачам исследования относилось: проведение модификации отработанного кизельгура различными химическими веществами с изменением концентрации оптимального модифицирующего вещества, температуры и продолжительности воздействия для создания адсорбента, очищающего воду от нефти; оптимизация методики получения адсорбента из модифицированного отработанного кизельгура, применяемого для очистки воды от нефти, на основании данных предварительных опытов с помощью системы статистического анализа Statistica 10.0.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследований являлись отработанный кизельгур, полученный на одном из крупных пивоваренных предприятий Самарской области, а также сырая нефть средней плотности. Влажный кизельгур высушивали при температуре 105 °C в сушильном шкафу ПЭ-4610 («Экоприбор», Россия) до постоянной массы. Сухой отработанный кизельгур растирали в фарфоровой ступке фарфоровым пестиком и использовали для проведения дальнейших исследований.

Для улучшения сорбционных свойств в отношении сырой нефти проводили модификации отработанного кизельгура на магнитной мешалке C-MAG HS 7 (IKA, Германия) различными химическими веществами в разных условиях проведения экспериментов.

Для выбора наиболее эффективного химического соединения, используемого в качестве модификатора, к навескам отработанного кизельгура массой по 10 г каждая приливали по 100 мл 1 М растворов кислот (серной, соляной, фосфорной и азотной), щелочей (гидроксидов калия и натрия), аммиака, пероксида водорода. Модификацию проводили в течение 60 мин при температуре 30 °C и частоте вращения 200 об/мин.

Для исследования влияния концентрации модифицирующего вещества на сорбционные свойства к навескам отработанного кизельгура массой по 10 г каждая приливали по 100 мл 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 М растворов наиболее эффективного модифицирующего

вещества. Модификацию проводили в течение 60 мин при температуре 30 °С и частоте вращения 200 об/мин.

Для определения влияния температуры модификации на сорбционные свойства к навескам отработанного кизельгура массой по 10 г каждая приливали по 100 мл раствора наиболее эффективного модифицирующего вещества оптимальной концентрации. Модификацию проводили в течение 60 мин при температурах 30, 45, 60, 75, 90 °С и частоте вращения 200 об/мин.

Для изучения влияния продолжительности воздействия вещества-модификатора на сорбционные свойства к навескам отработанного кизельгура массой по 10 г каждая приливали по 100 мл раствора наиболее эффективного модифицирующего вещества оптимальной концентрации. Модификацию проводили в течение 30, 60, 90, 120 мин при оптимальной температуре и частоте вращения 200 об/мин.

Для оптимизации методики получения сорбента из модифицированного отработанного кизельгура с целью очистки сточных вод от сырой нефти использовали систему статистического анализа Statistica 10.0, в которой для построения трехуровневого полного факторного плана эксперимента потребовалось проведение дополнительных опытов. При постановке дополнительных опытов к навескам отработанного кизельгура массой по 10 г каждая приливали по 100 мл 0,5, 1,5, 2,0 М раствора NaOH. Модификацию проводили в течение 30, 60 и 90 мин при температурах 60, 75 и 90 °С с частотой вращения 200 об/мин.

После проведения процесса модификации отработанный кизельгур промывали 10 раз, каждый раз используя по 100 мл дистиллированной воды, воду отделяли отстаиванием с последующей декантацией (сливанием с осадка). Промытый модифицированный кизельгур высушивали в фарфоровых чашках в сушильном шкафу ПЭ-4610 при температуре 105 °С до постоянной массы и использовали для проведения опытов по определению нефтеемкости. Немодифицированный отработанный кизельгур, высушенный при 105 °С, использовали в качестве контрольного образца.

Нефтеемкость отработанного кизельгура определяли по ТУ 214-10942238-03-95 [3]. При подготовке к испытанию из медной сетки вырезали квадраты размером 8×8 см, края квадратов загибали и делали отбортовку высотой 1 см, из кальки вырезали прокладки под сетки. На дно латунной сетки выкладывали кальку размером 7×7 см таким образом, чтобы бумага покрывала только дно сетки, не затрагивая ее края. В ходе холостого испытания взвешивали подготовленные сетки с отбортовкой и калькой внутри (масса $M_{\text{сет.1}}$ г), а также прокладку из кальки (масса $M_{\text{пр.}}$), прокладку из кальки оставляли на весах; сетку погружают в нефть или нефтепродукт, выдерживают 10–15 мин, давали стечь избытку нефти и производили взвешивание на прокладке (масса $M_{\text{н}}$ г). Массу нефти, удерживаемой сеткой ($M_{\text{Hсет.1}}$ г), вычисляли по формуле

$$M_{\text{Hсет.}} = M_{\text{H}} - M_{\text{сет.}} - M_{\text{пр.}}$$

Измерение проводили три раза, каждый раз промывая сетку бензином, высушивая ее и заменяя прокладку. Вычисляли среднее арифметическое значение.

При измерении сорбционной способности на чистую сетку помещали 5 г сорбента (масса $M_{\text{Сорб.}}$ г), на сорбент

сверху наливали нефть до насыщения сорбента, избытку нефти давали стечь, сетку с насыщенным сорбентом взвешивали на прокладке (масса $M_{\text{Hсорб.}}$ г). Массу нефти, поглощенной сорбентом ($M_{\text{Hпоглщ.}}$ г), рассчитывали по формуле

$$M_{\text{Hпоглщ.}} = M_{\text{Hсорб.}} - M_{\text{Hсет.}}$$

Нефтеемкость немодифицированного и модифицированного отработанного кизельгура (HE , г/г) определяли по формуле

$$HE = M_{\text{Hпоглщ.}} / M_{\text{Сорб.}}$$

Опыты проводили в трехкратной повторности, исследования каждой пробы осуществляли в трех повторностях. Математическую обработку результатов осуществляли с применением программы Excel.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты лабораторных исследований влияния различных веществ на нефтеемкость отработанного кизельгура представлены на рис. 1.

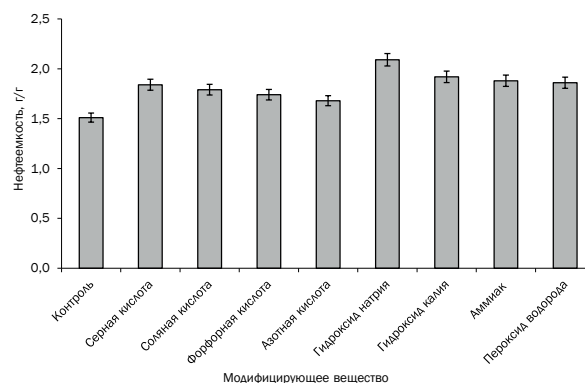


Рис. 1. Зависимость нефтеемкости отработанного кизельгура от вещества, применяемого для его модификации

Fig. 1. Oil capacity of spent diatomaceous earth versus modifying agent

Наибольшее влияние на нефтеемкость оказывает модификация отработанного кизельгура раствором гидроксида натрия, позволяющая увеличить процесс адсорбции нефти в 1,38 раза относительно этого же показателя у немодифицированного отработанного кизельгура. Наименьшее влияние на нефтеемкость оказывает модификация отработанного кизельгура раствором азотной кислоты, позволяющая увеличить нефтеемкость в 1,15 раза относительно контроля.

Полученные результаты можно объяснить тем, что химические реагенты способствуют увеличению площади поверхности и повышают количество функциональных групп на ней за счет расширения и освождения существующих пор, формирования новых пор в результате очистки кизельгура от загрязнений и примесей. Увеличение объема и количества пор приводит к возрастанию общей площади поверхности отработанного кизельгура, что, в свою очередь, увеличивает количество мест, доступных для адсорбции, и, следовательно, нефтеемкость, которая позволяет извлечь больше нефти при очистке воды.

В связи с тем, что нефтеемкость максимально увеличилась обработка отработанного кизельгура гидроксидом

натрия, в дальнейших опытах в роли модифицирующего реагента был использован именно он.

Исследование влияния концентрации модифицирующего вещества на сорбционные свойства отработанного кизельгура в отношении сырой нефти показало, что с увеличением концентрации модифицирующего вещества нефтеемкость модифицированного отработанного кизельгура сначала возрастает, а затем начинает снижаться (рис. 2). Наибольшей нефтеемкостью, составляющей 2,3 г/г, обладает отработанный кизельгур, модифицированный 1,5 М раствором гидроксида натрия.

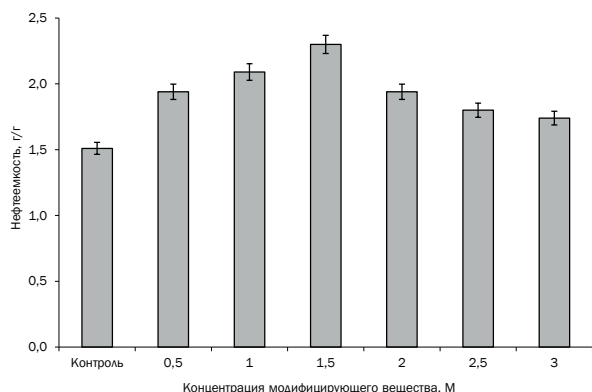


Рис. 2. Зависимость нефтеемкости отработанного кизельгура от концентрации гидроксида натрия, применяемого для его модификации

Fig. 2. Oil capacity of spent diatomaceous earth versus sodium hydroxide solution concentration

Изучение воздействия температуры проведения процесса модификации на нефтеемкость отработанного кизельгура показало, что с увеличением температуры проведения процесса модификации до 75 °С нефтеемкость модифицированного отработанного кизельгура возрастает до 2,84 г/г, а затем начинает снижаться (рис. 3).

При увеличении продолжительности проведения процесса модификации нефтеемкость отработанного кизельгура постепенно увеличивается (см. рис. 3). Наибольшая нефтеемкость, составляющая 3,14 г/г, обнаружена у отработанного кизельгура, модифици-

рованного 1,5 М раствором гидроксида натрия при температуре 75 °С в течение 120 мин.

В целом проведенные исследования показали, что максимальная нефтеемкость отработанного кизельгура наблюдается в результате проведения процесса его модификации 1,5 М раствором гидроксида натрия при температуре 75 °С в течение 120 мин.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при воздействии щелочи исходные поры природного кизельгура очистились от органических веществ пива, увеличилась шероховатость поверхности обрабатываемого материала и количество возможных реакционных центров.

Для оптимизации методики получения адсорбента из модифицированного отработанного кизельгура, применяемого для очистки воды от нефти, на основании данных предварительных опытов с помощью системы статистического анализа Statistica 10.0 был построен полный факторный план эксперимента (таблица).

Полный факторный план эксперимента по модификации отработанного кизельгура

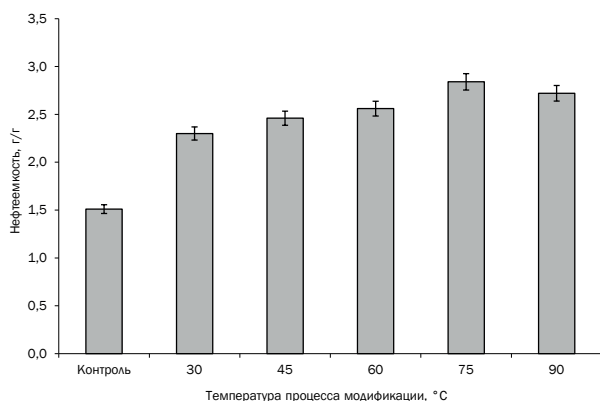
Full factorial design of experiment on spent diatomaceous earth modification

Номер опыта	Фактор		Отклик	
	T, °C	C, М	τ, мин	Y, г/г
1	60	0,5	30	2,28
2	60	1,5	90	2,60
3	60	2,5	60	2,52
4	75	0,5	90	2,48
5	75	1,5	60	2,84
6	75	2,5	30	2,64
7	90	0,5	60	2,36
8	90	1,5	30	2,65
9	90	2,5	90	2,42

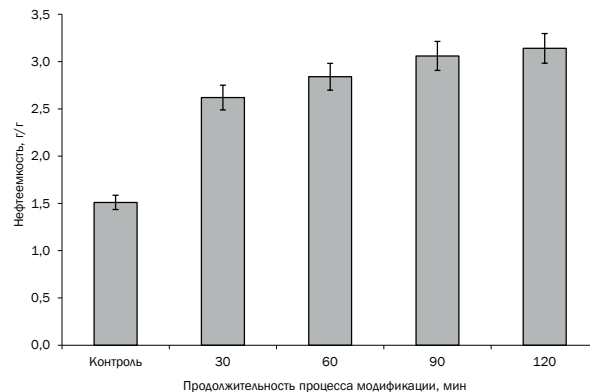
Примечание. T – температура проведения процесса модификации; C – концентрация модифицирующего реагента; τ – продолжительность процесса модификации; Y – нефтеемкость.

Поверхность отклика полученной математической модели описывает уравнение

$$Y = 2,53 + 0,12T + 0,26C + 0,09\tau + 0,28T^2 + 0,34C^2 + 0,16\tau^2.$$



a



b

Рис. 3. Зависимость нефтеемкости отработанного кизельгура от температуры (а) и продолжительности (б) его модификации

Fig. 3. Oil capacity of spent diatomaceous earth versus temperature (a) and duration of exposure (b)

Адекватность полученного уравнения подтверждается нормальным вероятностным графиком распределения остатков и диаграммой рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений (рис. 4).

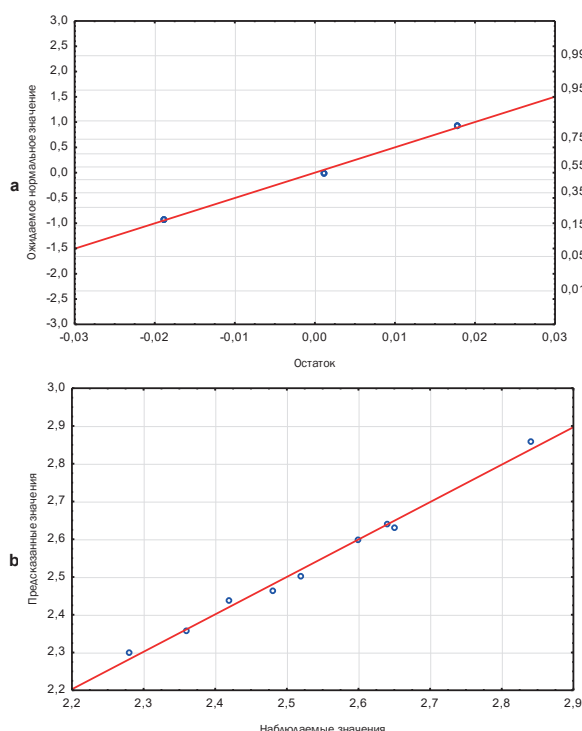


Рис. 4. Нормальный вероятностный график распределения остатков (а) и диаграмма рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений (б)

Fig. 4. Normal probability plot of residual allocation (a) and scatter diagram of the observable and predicted values (b)

Графические интерпретации полученной математической модели представлены на рис. 5–7.

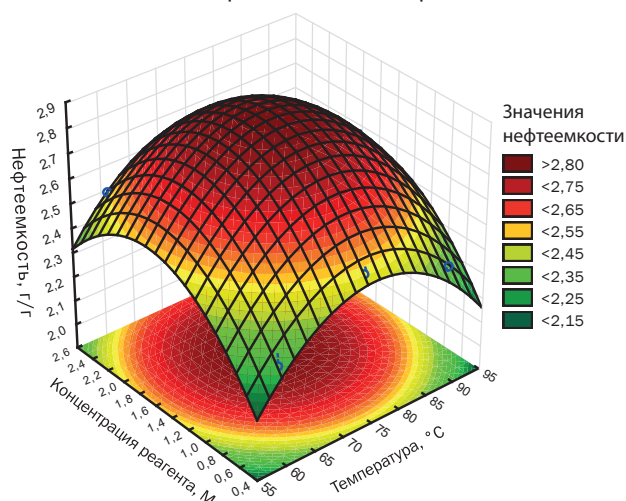


Рис. 5. Поверхность отклика зависимости нефтеемкости отработанного кизельгура от концентрации модифицирующего реагента и температуры проведения процесса модификации

Fig. 5. Response surface of the dependence of oil capacity of spent diatomaceous earth on the modifying agent concentration and the temperature of exposure

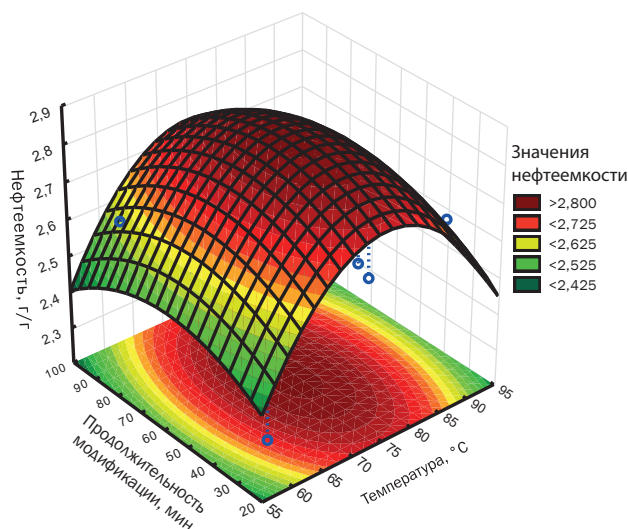


Рис. 6. Поверхность отклика зависимости нефтеемкости отработанного кизельгура от температуры и продолжительности проведения процесса модификации

Fig. 6. Response surface of the dependence of oil capacity of spent diatomaceous earth on the temperature and duration of exposure

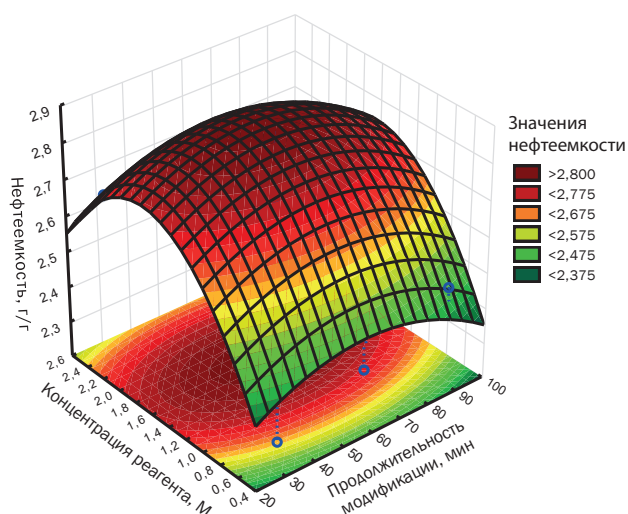


Рис. 7. Поверхность отклика зависимости нефтеемкости отработанного кизельгура от концентрации модифицирующего реагента и продолжительности проведения процесса модификации

Fig. 7. Response surface of the dependence of oil capacity of spent diatomaceous earth on the modifying agent concentration and duration of exposure

Анализ профилей предсказанных значений и функций желательности (рис. 8) показал, что для оптимального проведения процесса модификации отработанного кизельгура с целью получения адсорбента для очистки воды от нефти концентрация модифицирующего вещества (NaOH) должна быть 1,5 М, температура проведения процесса модификации должна составлять 75 °С, продолжительность процесса модификации – 60 мин.

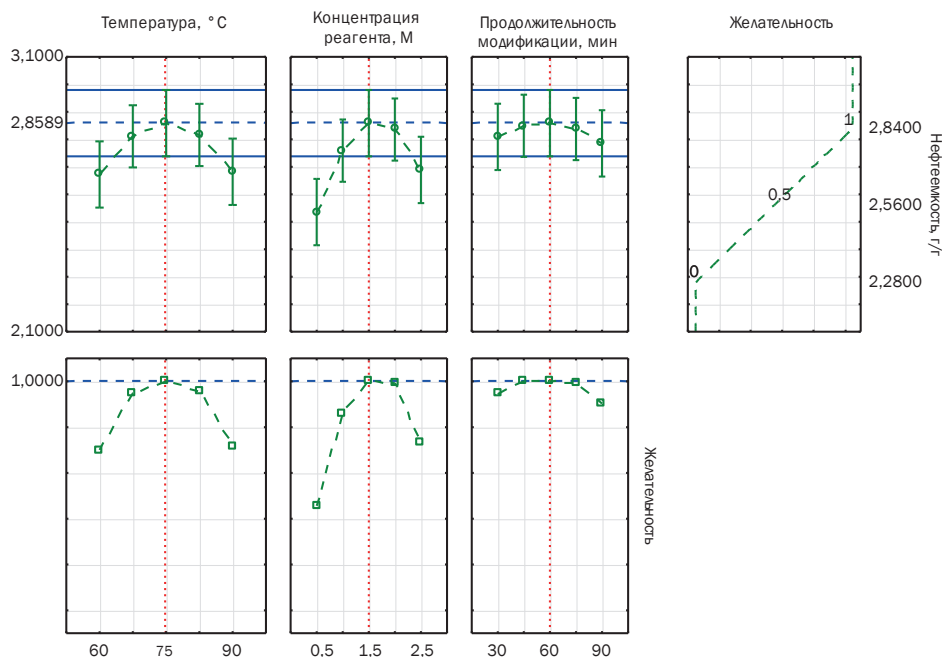


Рис. 8. Профили предсказанных значений и функций желательности

Fig. 8. Profiles of the predicted values and desirability functions

Анализ карты Парето стандартизованных эффектов (рис. 9) показал, что на процесс модификации отработанного кизельгура достоверно влияют концентрация модифицирующего реагента и температура проведения процесса модификации, поэтому при модификации отработанного кизельгура с целью получения адсорбента для очистки воды от нефти продолжительностью проведения процесса модификации можно пренебречь.

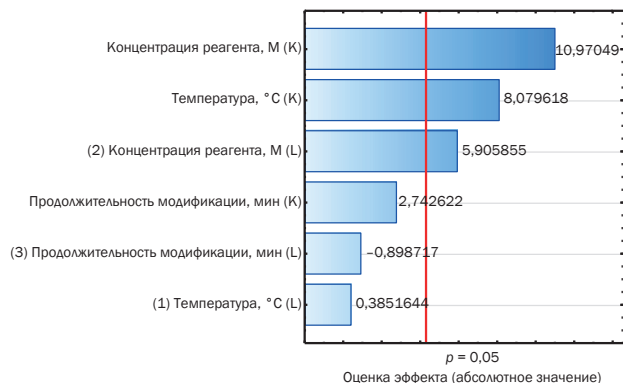


Рис. 9. Карта Парето стандартизованных эффектов

Fig. 9. Card of Pareto of the standardized effects

Исходя из соображений экономической целесообразности, чем меньше будет составлять продолжительность проведения процесса модификации, тем дешевле будет стоимость и больше доступность для потребителей адсорбента для очистки воды от нефти, полученного из отработанного кизельгура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования было выявлено, что с целью получения сорбента для очистки воды от нефти модификация отработанного кизельгура щелочами предпочтительнее, чем обработка его кислотами. Наибольшее влияние на нефтеемкость отработанного кизельгура оказывает его обработка раствором гидроксида натрия, наименьшее – раствором азотной кислоты. На процесс модификации отработанного кизельгура влияют концентрация реагента и температура проведения процесса. Сорбент для очистки воды от нефти можно получить в ходе модификации 10 г отработанного кизельгура 100 мл 1,5 М раствора гидроксида натрия на магнитной мешалке в течение 30 мин при температуре 75 °С и частоте вращения 200 об/мин с последующим промыванием дистиллированной водой и высушиванием при температуре 105 °С до постоянной массы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review // Sustainable Materials and Technologies. 2016. Vol. 9. P. 10–40. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002.
2. 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, no. 2-3. P. 277–296. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.007.

3. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 268 с.
4. Ma T., Wu Y., Liu N., Wu Y. Hydrolyzed polyacrylamide modified diatomite waste as a novel adsorbent for organic dye removal: adsorption performance and mechanism studies // Polyhedron. 2020. Vol. 175. P. 114227. DOI: 10.1016/j.poly.2019.114227.
5. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater

treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: current trends and emerging practices // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 47. P. 101432. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101432.

6. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. P. 102817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.102817.

7. Gong X., Tian W., Bai J., Qiao K., Zhao J., Wang L. Highly efficient deproteinization with an ammonifying bacteria *Lysinibacillus fusiformis* isolated from brewery spent diatomite // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2019. Vol. 127, no. 3. P. 326–332. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2018.08.004.

8. Shih Y.-F., Wang C.-H., Tsai M.-L., Jehng J.-M. Shape-stabilized phase change material/nylon composite based on recycled diatomite // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 242. P. 122498. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122498.

9. Adesanya E., Perumal P., Luukkonen T., Yliniemi J., Ohenoja K., Kinnunen P., Illikainen M. Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: a review of side-stream based activators // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 286. P. 125558. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125558.

10. Okeyinka O.M., Oloke D.A., Adebisi W.A., Ayininuola G.M. Investigation into the applicability of brewery sludge residue-ash as a base material for geopolymer concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. P. 28–32. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.214.

11. Domínguez-Santos D., Letelier V., Muñoz P. Seismic capacity of 2- and 3-storey RC buildings with eco-concrete made by using residues for replacing natural aggregates // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 101086. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101086.

12. Al-Fakih A., Mohammed B.S., Liew M.S., Nikbakht E. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 21. P. 37–54. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.09.023.

13. Wille C.L., Wille P.E., Rosa J.M., Boff M.I.C., Franco C.R. Efficacy of recovered diatomaceous earth from brewery to control *Sitophilus zeamais* and *Acanthoscelides obtectus* // *Journal of Stored Products Research*. 2019. Vol. 83. P. 254–260. DOI: 10.1016/j.jspr.2019.07.004.

14. Tesfahun W., Zerfu A., Shumuye M., Abera G., Kidane A.,

Astatkie T. Effects of brewery sludge on soil chemical properties, trace metal availability in soil and uptake by wheat crop, and bioaccumulation factor // *Heliyon*. 2021. Vol. 7, no. 1. P. e05989. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e05989.

15. Руденко Е.Ю., Бахарев В.В., Муковнина Г.С., Макарова А.А., Бейбулатов С.Ю., Макеева Е.Н. [и др.]. Влияние различных способов термохимической активации отработанного кизельгура на процесс очистки сточных вод от меди // *Экология промышленного производства*. 2017. N 1. С. 18–21. DOI: 10.52190/2073-2589_2022_1_18. EDN: XXRUUV.

16. Руденко Е.Ю., Бейбулатов С.Ю., Муковнина Г.С., Бахарев В.В. Влияние различных веществ на модификацию отработанного кизельгура, используемого для удаления свинца из сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. N 1. С. 19–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-1-19-23. EDN: FCJWIU.

17. Руденко Е.Ю., Макеева Е.Н., Ващенко В.В., Бахарев В.В., Муковнина Г.С., Ермаков В.В. Влияние способов модификации на свойства отработанного кизельгура, используемого для удаления нефти из сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. N 1. С. 20–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-20-25. EDN: YSZPNR.

18. Semião M.A., Haminiuk C.W.I., Maciel G.M. Residual diatomaceous earth as a potential and cost effective biosorbent of the azo textile dye Reactive Blue 160 // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 103617. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103617.

19. Tao X., Wu Y., Sha H. Cuprous oxide-modified diatomite waste from the brewery used as an effective adsorbent for removal of organic dye: adsorption performance, kinetics and mechanism studies // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. P. 322. DOI: 10.1007/s11270-018-3977-9.

20. Tsai W.-T., Hsu H.-C., Su T.-Y., Lin K.-Y., Lin C.-M. Removal of basic dye (methylene blue) from wastewaters utilizing beer brewery waste // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 154, no. 1-3. P. 73–78. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.107.

21. Tsai W.-T., Hsien K.-J., Lai C.-W. Chemical activation of spent diatomaceous earth by alkaline etching in the preparation of mesoporous adsorbents // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2004. Vol. 43, no. 23. P. 7513–7520. DOI: 10.1021/ie0400651.

REFERENCES

1. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016;9:10-40. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002.

2. 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(2-3):277-296. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.007.

3. Kamenshchikov F.A., Bogomolny Ye.I. Oil sorbent products. Moscow – Izhevsk: Institute of Computer Science; 2003, 268 p. (In Russian).

4. Ma T., Wu Y., Liu N., Wu Y. Hydrolyzed polyacrylamide modified diatomite waste as a novel adsorbent for organic dye removal: adsorption performance and mechanism studies. *Polyhedron*. 2020;175:114227. DOI: 10.1016/j.poly.2019.114227.

5. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: current trends and emerging practices. *Sustainable*

Energy Technologies and Assessments. 2021;47:101432. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101432.

6. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2020;256:102817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.102817.

7. Gong X., Tian W., Bai J., Qiao K., Zhao J., Wang L. Highly efficient deproteinization with an ammonifying bacteria *Lysinibacillus fusiformis* isolated from brewery spent diatomite. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2019;127(3):326-332. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2018.08.004.

8. Shih Y.-F., Wang C.-H., Tsai M.-L., Jehng J.-M. Shape-stabilized phase change material/nylon composite based on recycled diatomite. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;242:122498. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122498.

9. Adesanya E., Perumal P., Luukkonen T., Yliniemi J., Ohenoja K., Kinnunen P., Illikainen M. Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: a review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*. 2021;286:125558. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125558.

10. Okeyinka O.M., Oloke D.A., Adebisi W.A., Ayinuola G.M. Investigation into the applicability of brewery sludge residue-ash as a base material for geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;223:28-32. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.214.

11. Domínguez-Santos D., Letelier V., Muñoz P. Seismic capacity of 2- and 3-storey RC buildings with eco-concrete made by using residues for replacing natural aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2020;28:101086. DOI: 10.1016/j.job.2019.101086.

12. Al-Fakih A., Mohammed B.S., Liew M.S., Nikbakht E. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review. *Journal of Building Engineering*. 2019;21:37-54. DOI: 10.1016/j.job.2018.09.023.

13. Wille C.L., Wille P.E., Rosa J.M., Boff M.I.C., Franco C.R. Efficacy of recovered diatomaceous earth from brewery to control *Sitophilus zeamais* and *Acanthoscelides obtectus*. *Journal of Stored Products Research*. 2019;83:254-260. DOI: 10.1016/j.jspr.2019.07.004.

14. Tesfahun W., Zerfu A., Shumuye M., Abera G., Kidane A., Astatkie T. Effects of brewery sludge on soil chemical properties, trace metal availability in soil and uptake by wheat crop, and bioaccumulation factor. *Heliyon*. 2021;7(1):e05989. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e05989.

15. Rudenko E.Yu., Bakharev V.V., Mukovnina G.S., Makarova A.A., Beybulatov S.Yu., Makeeva E.N., et al. Influence of various means of thermochemical activation of the fulfilled kieselguhr on process of sewage treatment from copper. *Industrial ecology*. 2017;1:18-21. (In Russian). DOI: 10.52190/2073-2589_2022_1_18. EDN: XRUUV.

16. Rudenko E.Yu., Beibulatov S.Yu., Mukovnina G.S., Bakharev V.V. The effect of various substances on the modification of spent kieselguhr used to remove lead from wastewater. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(1):19-23. (In Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-1-19-23. EDN: FCJWIU.

17. Rudenko E.Yu., Makeeva E.N., Vaschenko V.V., Bakharev V.V., Mukovnina G.S., Ermakov V.V. How the modifying methods influence over the properties of waste kieselgur used for removing oil from waste waters. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;23(1):20-25. (In Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-20-25. EDN: YSZPNR.

18. Semião M.A., Haminiuk C.W.I., Maciel G.M. Residual diatomaceous earth as a potential and cost effective biosorbent of the azo textile dye Reactive Blue 160. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(1):103617. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103617.

19. Tao X., Wu Y., Sha H. Cuprous oxide-modified diatomite waste from the brewery used as an effective adsorbent for removal of organic dye: adsorption performance, kinetics and mechanism studies. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2018;229:322. DOI: 10.1007/s11270-018-3977-9.

20. Tsai W.-T., Hsu H.-C., Su T.-Y., Lin K.-Y., Lin C.-M. Removal of basic dye (methylene blue) from wastewaters utilizing beer brewery waste. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;154(1-3):73-78. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.107.

21. Tsai W.-T., Hsien K.-J., Lai C.-W. Chemical activation of spent diatomaceous earth by alkaline etching in the preparation of mesoporous adsorbents. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2004;43(23):7513-7520. DOI: 10.1021/ie0400651.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Руденко Елена Юрьевна,
д.б.н., доцент, профессор,
Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
Российская Федерация,
e_rudenko@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочел и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.11.2024.
Одобрена после рецензирования 25.12.2024.
Принята к публикации 28.02.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elena Yu. Rudenko,
Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Professor,
Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, 127434,
Russian Federation,
e_rudenko@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Contribution of the author

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the manuscript for publication.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 19.11.2024.
Approved after reviewing 25.12.2024.
Accepted for publication 28.02.2025.