

Научная статья

УДК 536.242

DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_11

Модифицированные сорбенты из пеносиликатов. Кинетические особенности нефтепоглощения

О.Н. Цыбульская, ✉ Т.В. Ксеник, А.А. Юдаков, А.А. Кисель, В.Ф. Павлов

Оксана Николаевна Цыбульская

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

ont55@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4215-7041>

Татьяна Витальевна Ксеник

научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

tksenic2609@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3578-7096>

Александр Алексеевич Юдаков

доктор технических наук, главный научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

etcih@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7264-2761>

Алексей Альфредович Кисель

ведущий инженер

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

musson_k@mail.ru

Вячеслав Фролович Павлов

доктор химических наук, главный научный сотрудник

Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия

sktb@ksc.krasn.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0551-4601>

Аннотация. В работе рассмотрены методы модификации алюмосиликатных материалов с целью получения нефтесорбентов. Представлены результаты исследования сорбционных свойств термохимически модифицированного гранулированного пеносиликата, полученного из отходов руды слюдяного сланца. Проведен сравнительный анализ водопоглощения и нефтепоглощения для модифицированных и необработанных образцов. Установлена

специфика и обоснован характер кинетических кривых. Показана возможность использования модифицированного пеносиликата в качестве сорбента нефтепродуктов.

Ключевые слова: алюмосиликатные сорбенты, гранулированный пеносиликат, модифицирующая обработка, пористая структура, водопоглощение, нефтепоглощение, кинетические зависимости, нефтепродукты

Для цитирования: Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Юдаков А.А., Кисель А.А., Павлов В.Ф. Модифицированные сорбенты из пеносиликатов. Кинетические особенности нефтепоглощения // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 6. С. 122–134. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2022_226_06_11.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № 0205-2022-0002.

Original article

Modified sorbents from foam silicates. Kinetic peculiarities of oil absorption

O.N. Tsybulskaya, T.V. Ksenik, A.A. Yudakov, A.A. Kisel, V.F. Pavlov

Oksana N. Tsybulskaya

Candidate of Sciences in Engineering, Senior Researcher
Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia
ont55@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4215-7041>

Tatyana V. Ksenik

Researcher
Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia
tksenik2609@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3578-7096>

Alexander A. Yudakov

Doctor of Sciences in Engineering, Chief Researcher
Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok,
Russia
etcih@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7264-2761>

Alexey A. Kisel

Lead Engineer
Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia
musson_k@mail.ru

Vyacheslav F. Pavlov

Doctor of Sciences in Chemistry, Chief Researcher
Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk, Russia
sktb@ksc.krasn.ru

Abstract. The article considers methods for modifying aluminosilicate materials in order to obtain oil sorbents. The results of studying the sorption properties of thermochemically modified granular

foam silicate obtained from mica shale ore waste are presented. A comparative analysis of water absorption and oil absorption of modified and untreated samples was carried out. The features are established and the nature of the kinetic curves is substantiated. The possibility of using a modified foam silicate as a sorbent for oil products is shown.

Keywords: aluminosilicate sorbents, granular foam silicate, modifying treatment, porous structure, water absorption, oil absorption, kinetic dependences, oil products

For citation: Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A., Pavlov V.F. Modified sorbents from foam silicates. Kinetic peculiarities of oil absorption. *Vestnik of the FEB RAS*. 2022;(6): 122-134. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2022_226_06_11.

Finding. The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 0205-2022-0002.

Введение

Предотвращение загрязнения поверхностных и подземных вод и восстановление водных экосистем в настоящее время – приоритетные задачи по защите окружающей среды. Решение проблем очистки загрязненных водных объектов связано с разработкой новых сорбентов, в том числе высокоэффективных сорбентов нефти и нефтепродуктов для очистки нефтесодержащих сточных вод и устранения последствий нефтеразливов. Для получения нефтяных сорбентов используются различные материалы как природного, так и искусственного происхождения [1, 2]. Успешно применяются сорбенты на основе растительных отходов, на синтетической основе (полиэтилен, полипропилен), углеродные, сорбенты на основе пористых алюмосиликатных материалов (перлит, вермикулит, керамзит) и др. Преимуществом неорганических сорбентов природного и искусственного происхождения является комплекс свойств, прежде всего высокая адсорбционная емкость, химическая и термическая стойкость, экологическая безвредность, невысокая стоимость. А с точки зрения возможности регенерации предпочтение отдается неорганическим сорбентам в сравнении с органическими природными или синтетическими материалами.

В работах [3–5] приведен сравнительный анализ различных сорбционных материалов по нефтеемкости, скорости сорбции, характеру пористой структуры, возможности повторного использования и вторичной переработки. Авторами показано, что олеофильность и гидрофобность – основные качественные характеристики сорбентов нефти.

Ряд природных, неорганических и синтетических алюмосиликатов способны селективно притягивать нефть, но не всегда удовлетворяют требуемым критериям нефтеемкости, а также способности удерживать нефтепродукты. Улучшить олеофильные и гидрофобные свойства таких материалов можно, применив различные способы модифицирования их поверхности. Известные методы обработки алюмосиликатов различаются видом модифицирующих веществ и их агрегатным состоянием. Мономолекулярные гидрофобные слои или тонкие гидрофобные пленки получают обработкой материала растворами, эмульсиями или (реже) парами веществ, слабо взаимодействующих с водой, но прочно удерживающихся на поверхности.

Например, объектом для модификации может быть вермикулит, который вследствие несовершенства кристаллической решетки легко разбухает в воде и

во многих органических жидкостях, поэтому в чистом виде его нельзя использовать в качестве сорбента нефти. С целью получения нетонущих гидрофобных нефтесорбентов в работе [6] проведены исследования модификации поверхности термоактивированного вермикулита. В качестве гидрофобизаторов были выбраны кремнийорганические соединения (органосилоксаны) на водной основе и на основе органических растворителей (уайт-спирит, этиловый спирт). Гидрофобизацию проводили в жидкой фазе, эмульсию гидрофобизатора соединяли с вермикулитом, тщательно перемешивали, выдерживали 15 мин, затем сушили в течение 48 ч до наступления полного гидрофобного эффекта.

Исследования [7] по изучению эффективности применения модифицированного гидрофобного вермикулита для очистки от нефтепродуктов показали, что обработка термоактивированного вермикулита нещелочным кремнийорганическим соединением – олигометилсилоксаном позволяет получить нетоксичный сорбент, обладающий высокими показателями по водостойкости и способности длительно удерживаться на поверхности воды. После применения в процессе очистки сорбенты на основе вермикулита можно обжечь, модифицировать и использовать повторно.

Другой объект для модификации – слоистый силикат монтмориллонит, который имеет ярко выраженные сорбционные свойства и обладает благодаря своему строению способностью к сильному набуханию. Авторы работы [8] изучали метод модификации поверхности монтмориллонита гексадецилтриметиламмонием (НДТМА). Суть метода состоит в замещении катионов на поверхности природного монтмориллонита на органические катионы НДТМА в его водном растворе.

В работе [9] представлены результаты изучения сорбционной способности вспученного перлита после модифицирования его поверхности синтетическими полимерными материалами – поливинилацетатом и поливинилхлоридом. Оптимальные условия модифицирования для закрепления молекул полимеров на поверхности перлита авторы устанавливали экспериментальным путем. Поверхность перлита обрабатывалась раствором активатора (моноклорамин-ХБ) в этилацетате. Затем материал пропитывали модификатором в виде растворов в бинарной смеси растворителей (циклогексанон-толуол, в соотношении 1:3). После сушки перлит приобретает гидрофобные свойства, сорбционная емкость по отношению к нефтепродуктам в статических условиях повышалась на 20–40 %.

Описанные методы формирования гидрофобных покрытий [6–9] основаны на обработке алюмосиликатных материалов в жидкой фазе, т.е. нанесении раствора модификатора на поверхность частиц с последующим удалением растворителя в процессе сушки. Нужно отметить, что в случае обработки поверхности дисперсного материала растворами модификаторов трудно избежать агломерации частиц. Обработка в парогазовой фазе модифицирующих веществ или в газовой среде открывает возможности получения сорбентов на основе мелкодисперсных материалов с использованием широкого ассортимента модификаторов.

Авторами работы [10] приведены результаты исследования модификации поверхности вспученного перлита методом плазменно-химического осаждения из паровой фазы. Для эффективного перемешивания используют вращающийся плазменный реактор. Материал приобретает супергидрофобность в результате образования тонкой полимерной пленки, после модифицирования морфология частиц перлита не изменяется. Однако предлагаемая авторами технология требует

использования целого комплекса дорогостоящего оборудования, что усложняет и удорожает ее осуществление.

Другой пример получения сорбента на основе вермикулита описан в работе [11]. Авторы предлагают проводить обжиг и обработку вермикулита углеводородами нефтяного происхождения (дизтопливо, флотский мазут, моторное масло, керосин, парафин) одновременно в струе раскаленных газов, образующихся при сгорании топлива в факеле форсунки. В результате получают углеродсодержащий сорбент с содержанием углерода 0,7–1,1 %, имеющий гидрофобный нанослой на поверхности. Полученный сорбент обладает ионообменной активностью и значительной нефтеемкостью, что позволяет использовать его для очистки вод от многокомпонентных загрязнений. Очевидно, что обжиг вермикулита в струе газов будет эффективен для легких и мелких фракций, при обработке вермикулита крупных фракций ухудшится качество получаемого сорбента. Кроме того, для получения потока теплоносителя и гидрофобизирующего газа необходимо применение форсуночных устройств и использование компрессора для получения сжатого воздуха.

Особый интерес в качестве перспективных материалов для получения сорбентов представляют пеностекла, в рассматриваемом аспекте это наименее изученный материал. В работе [12] исследованы физико-химические закономерности получения стеклообразных нефтесорбентов. В качестве основы использовано объемно-пористое пеностекло, выпускаемое промышленностью. Гидрофобизация образцов пеностекла фракции 3–8 мм проводилась путем термической обработки в растворе силана. Образцы полученного сорбента имели нулевое водопоглощение, плавучесть превышала 4 мес., десорбции нефтепродукта из образцов не наблюдалось.

Авторами настоящей статьи исследован гранулированный пеносиликат в качестве основы для олеофильных сорбентов нефтепродуктов [13]. Образцы пеносиликата получены по разработанной в СО РАН технологии безотходной переработки техногенного рудного и нерудного сырья методом восстановительной плавки с разделением расплавленного материала на рентгеноаморфный пеносиликат стабильного химического состава и металлическую часть [14].

Цель данной работы – изучение основных характеристик сорбционных материалов на основе пеносиликатов, исследование особенностей водопоглощения и нефтепоглощения в статических условиях, сопоставление с алюмосиликатными сорбентами нефтепродуктов, модифицированными по технологии, разработанной в Институте химии ДВО РАН, а также оценка целесообразности использования пеносиликатов в качестве сорбентов нефтепродуктов.

Материалы и методы

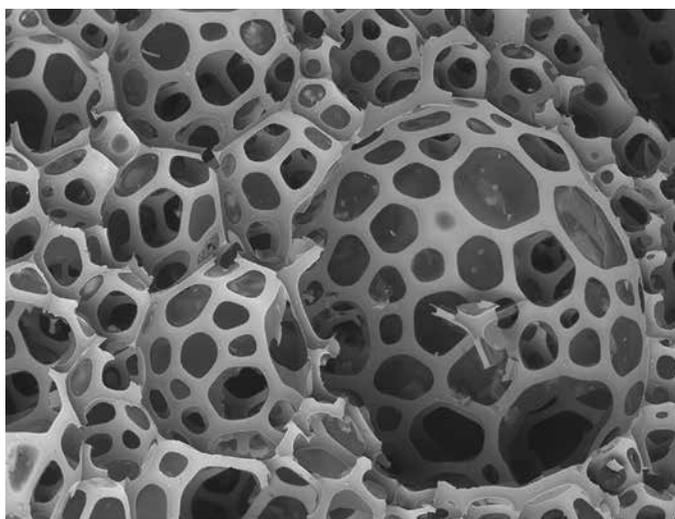
Образцы пеносиликата, выбранные в качестве объектов исследования, были получены из отходов руды слюдяного сланца [14]. Технология получения включает плавление шихты в восстановительной среде с предварительным доведением содержания оксидов кремния и кальция до массового отношения SiO_2/CaO , равного интервалу 1–2. Шихту плавят в барботируемом шлаковом расплаве в печи Ванюкова. В результате охлаждения силикатной части расплава в режиме термоудара образуется высокопористый рентгеноаморфный пеносиликат (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид пеносиликата

На рис. 2 представлена фотография микроструктуры образца пеносиликата, полученная на электронном микроскопе ТМ 3000 [15]. Видно, что поры имеют размер от 50 до 300 мкм, межпоровая перегородка в среднем составляет 30 мкм. Некоторые поры закрыты тонким слоем стекла, разрушение которого, по всей вероятности, происходило вследствие резкого охлаждения расплава в режиме термоудара из-за недостаточной прочности матрицы вспененного расплава, что в итоге влияет на соотношение открытых и закрытых пор, от которого зависят и сорбционные свойства вспененного материала.

Методом отсева гранулированного пеносиликата на ситах получали необходимые для экспериментов фракции размером от 2 до 8 мм с насыпной плотностью 70–150 кг/м³. Образцы с маркировкой П1/П2, выбранные для испытаний, содержат следующие оксиды (масс.%): СаО – 44,3/37,4; SiO₂ – 29,5/41,2; Al₂O₃ – 14,2/11,9; MgO – 4,04/3,11; TiO₂ – 2,50/1,42; K₂O – 4,15/3,35, соответственно. Количество других оксидов металлов в образцах незначительно. Основные компоненты СаО, SiO₂, Al₂O₃ определяют химические особенности поверхности образцов.



TM3000_9434 2019-04-18 HL D6.9 x60 1 mm
obtained by FRC KSC SB of RAS

Рис. 2. Микроструктура образца пеносиликата

Для получения олеофильного материала на основе пеносиликата проводили его модифицирующую обработку. Технологические режимы, аппаратное оформление и опытно-промышленная установка были разработаны и испытаны авторами ранее при получении сорбентов на основе различных пористых алюмосиликатов [16].

Образцы П1 и П2 обрабатывали по следующему режиму: прокаливание при температуре 350–380 °С, термохимическая модификация при температуре 480–550 °С и разрежении 75–80 кПа. В качестве модифицирующего вещества использовали мазут марки М-100 (ГОСТ 10585-2013) и высокоочищенный парафин нефтяной марки П-2 (ГОСТ 23683-89).

Результаты и обсуждение

После модифицирующей обработки образцы пеносиликата не изменяют пористой структуры, сохраняют аморфное состояние, приобретают гидрофобность и олеофильность. Статический угол смачивания на поверхности частиц составляет 142–145 ° [13].

Для проверки стабильности гидрофобных свойств были выполнены исследования степени водопоглощения пеносиликата. Водопоглощение в статических условиях по отношению к дистиллированной воде определяли по весовой методике. Результаты первых замеров показали, что влагосодержание у модифицированных образцов практически в два раза ниже, чем у немодифицированных (рис. 3).

Незначительное кратковременное снижение массы образцов и падение влагоемкости на графиках наблюдались через 1,6 и 2,7 ч. Механизм этого объясняется следующим. В начале испытаний вода активно проникает в открытые поры и капилляры частиц пеносиликата, удерживается там, и влагоемкость увеличивается. Далее вода, заполняя поры, создает в них давление, которое выше, чем давление воздуха в закрытых или в недоступных порах. Под действием давления воды пористая структура частично разрушается, поры укрупняются. Вследствие уменьшения сил капиллярного действия в порах снижается удерживающая способность материала. То есть условно можно выделить две чередующиеся стадии процесса водопоглощения: стадию заполнения пор и стадию частичного их разрушения.

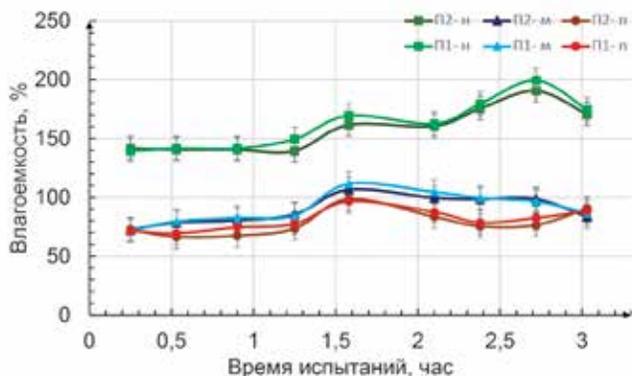


Рис. 3. Водопоглощающая способность образцов пеносиликата: П1-н, П2-н – необработанные образцы; П1-м, П2-м – модифицированные мазутом; П1-п, П2-п – модифицированные парафином

При продолжении испытаний вода, продвигаясь по открывшимся капиллярам, начинает заполнять внутренние ранее недоступные мелкие поры и тонкие капилляры, силы капиллярного действия удерживают воду во внутреннем поровом пространстве, увеличиваются удерживающая способность и, соответственно, влагоемкость.

Длительные испытания на водопоглощение

были проведены в течение 4 сут., результаты показали, что после 20 ч для модифицированных образцов влагоемкость повысилась незначительно (рис. 4).

Основной качественной характеристикой нефтесорбентов является нефтеемкость. Для определения нефтепоглощения пеносиликата была использована весовая методика в соответствии с рекомендациями международного стандарта ASTM F726-17.

Испытания на нефтепоглощение по отношению к дизельному топливу (ТУ 38.101889–81) проводили на образцах пеносиликата П1 и П2, водонасыщенных после исследований на влагоемкость. Результаты, полученные в течение первых 5 ч, показывают, что нефтепоглощение модифицированных образцов выше, максимальное поглощение нефтепродукта образцом пеносиликата П1-м и П2-м происходит через 1,3 ч от начала испытаний (рис. 5). Снижение нефтепоглощения во временном интервале 1,3–2 ч характерно для всех образцов. Для необработанных образцов наблюдается повторное снижение нефтепоглощения после 3 ч испытаний. Это связано с удерживающей способностью материала по отношению к нефтепродуктам. При контакте пеносиликата с дизельным топливом первоначально происходят быстрая адсорбция нефтепродукта, увеличение массы образца и рост нефтеемкости. Как и в случае испытания на влагоемкость, снижение массы образцов и кратковременное падение нефтеемкости можно объяснить укрупнением пор и капилляров за счет частичного разрушения межпоровых перегородок и снижением сил капиллярного действия в них. Поэтому при извлечении образца из дизельного топлива для проведения измерений часть нефтепродукта высвобождается, причем масса высвобождающегося нефтепродукта превышает массу адсорбированного. Особенно это характерно для олеофильных образцов, так как нефтепродукт, адсорбируясь на поверхности, вытесняет воду из водонасыщенного образца. На графиках видно, что кратковременное снижение нефтеемкости для олеофильных образцов более резкое, чем для необработанного пеносиликата.

В дальнейшем за счет внутренней диффузии нефтепродукт проникает вглубь структуры частиц пеносиликата в доступные по размерам поры, освобождая внешнюю

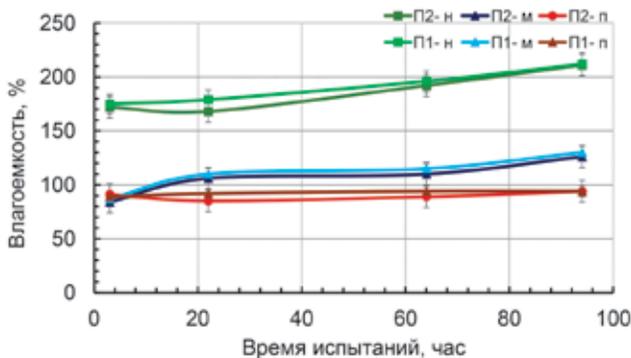


Рис. 4. Влагоемкость образцов пеносиликата в результате длительных испытаний

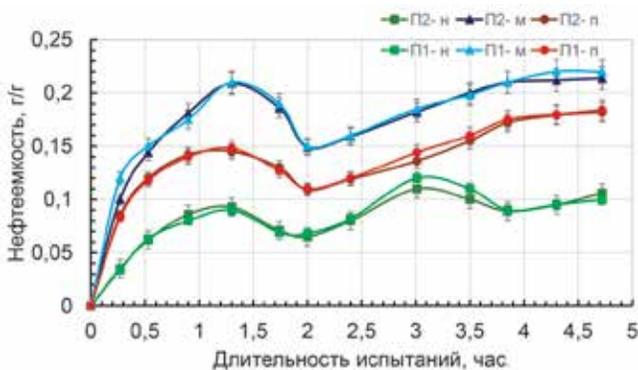


Рис. 5. Нефтепоглощение водонасыщенных образцов пеносиликата

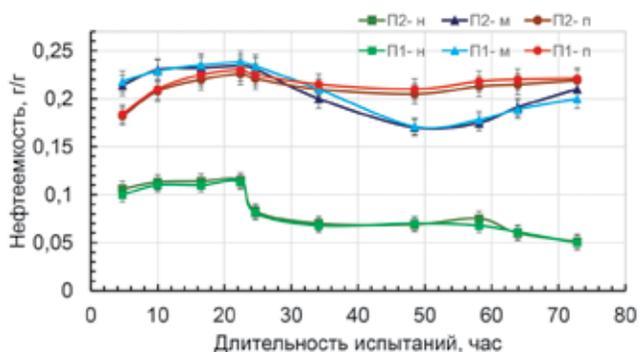


Рис. 6. Нефтепоглощение водонасыщенных образцов в результате длительных испытаний

максимумов на кинетических кривых нефтепоглощения установлен в работе [12]. Авторы утверждают, что такие зависимости ранее не были известны и объясняют наличие максимумов в начальный период времени особенностями стеклообразного состояния материала.

Продолжительные испытания водонасыщенных образцов пеносиликата на адсорбцию нефтепродуктов были проведены в течение 74 ч (рис. 6). Результаты показали незначительное падение нефтеемкости после 22–24 ч испытаний для модифицированных образцов, что также связано с удерживающей способностью материала. После 74 ч нефтеемкость составила 22–23 %. Для необработанного пеносиликата нефтеемкость резко упала после 24 ч и в дальнейшем медленно снижалась до 5 %. Таким образом, в результате модификации поверхности пеносиликата адсорбционная емкость водонасыщенных образцов возрастает более чем в 2 раза.

Результаты определения нефтепоглощения для неводонасыщенных сухих образцов в течение 24 ч показали высокую сорбционную емкость по отношению к дизельному топливу (табл. 1).

Для сравнения в табл. 1 также представлены характеристики алюмосиликатных материалов, модифицированных в парогазовой фазе углеводородных соединений по технологии, разработанной в Институте химии ДВО РАН [16].

Таблица 1

Сравнительная оценка модифицированного пеносиликата по отношению к другим сорбционным материалам

| Модифицированные алюмосиликаты | Краевой угол, град. | Сорбционная емкость по дизельному топливу, г/г |
|--------------------------------|---------------------|--|
| Пеносиликат | | |
| Образец П1-м | 142 | 1,92 |
| Образец П1-п | 145 | 1,98 |
| Образец П2-м | 143 | 1,89 |
| Образец П2-п | 145 | 1,97 |
| Вспученный аргиллит | 97 | 0,49 |
| Вспученный перлит | 102 | 1,94 |
| Вулканический туф | 100 | 0,4 |
| Цеолит | 46 | 0,14 |
| Керамзит | 92 | 0,3 |

При проведении экспериментов по определению водопоглощения и нефтепоглощения пеносиликата использовали весовой метод. Каждое определение массы образца дает лишь приблизительное значение величины и зависит не только от точности прибора, но и от внешних условий. Для оценки точности проведения эксперимента нами была проведена оценка погрешности результатов измерений.

Измерения массы проводили на аналитических весах OHAUS Adventurer AX324 дискретностью 0,0001 г. Для определения каждой экспериментальной величины выполняли 5 измерений. Наиболее вероятный результат измерений \bar{Y} принимали равным среднему арифметическому значению результатов пяти измерений Y_i .

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений от среднеарифметического вычисляли по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (Y_i - \bar{Y})^2}{5(5-1)}}.$$

При расчете доверительного интервала полученных экспериментальных значений на основе пятикратных измерений корректней пользоваться распределением Стьюдента. Оптимальное значение доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Границы доверительного интервала для экспериментальных измерений определяются как $\Delta Y_{из} = t\sigma$, где t – табличная величина, равная 2,78.

Доверительный интервал однократных измерений (инструментальная погрешность) оценивался по формуле $\Delta Y_{np} = \alpha \cdot d = 0,95 d$, где d – параметр равномерного распределения, связанный с ценой деления или классом точности измерительного прибора.

Общая (абсолютная) погрешность определялась как корень из суммы квадратов погрешностей: $\Delta Y = \sqrt{\Delta Y_{из}^2 + \Delta Y_{np}^2}$. Относительная погрешность вычислялась по формуле

$$\delta = \frac{\Delta Y}{\bar{Y}} 100 \text{ \%}.$$

Результаты измерений и расчета погрешности для выбранных экспериментальных точек для образца пеносиликата П2-м приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений и расчета погрешности

| Параметр | Влагопоглощение, % (точка 1,25 час, 78 %, рис. 3) | Нефтепоглощение, г/г (точка 1,3 ч, 0,21 г/г, рис. 5) | Сорбционная емкость сухого образца, г/г |
|--|--|---|--|
| Измерения | | | |
| Y_1 | 80 | 0,21 | 1,87 |
| Y_2 | 78 | 0,21 | 1,94 |
| Y_3 | 76 | 0,20 | 1,85 |
| Y_4 | 77 | 0,20 | 1,96 |
| Y_5 | 79 | 0,21 | 1,82 |
| Вероятный результат измерений | 78 | 0,206 | 1,888 |
| Среднеквадратичное отклонение результатов | 0,6708 | 0,00245 | 0,0267 |

| Параметр | Влагопоглощение, % (точка 1,25 час, 78 %, рис. 3) | Нефтепоглощение, г/г (точка 1,3 ч, 0,21 г/г, рис. 5) | Сорбционная емкость сухого образца, г/г |
|---------------------------------------|--|---|--|
| Доверительный интервал: | | | |
| из | 1,8648 | 0,006811 | 0,0743 |
| пр | 0,000095 | 0,000095 | 0,000095 |
| Абсолютная погрешность ΔY | 1,8648 | 0,00681 | 0,07428 |
| Относительная погрешность δ | $\pm 2,39$ | $\pm 3,31$ | $\pm 3,95$ |
| Результат | $78,0 \pm 1,9$ | $0,206 \pm 0,007$ | $1,89 \pm 0,07$ |

Заключение

Исследованы сорбционные свойства термохимически модифицированного пеносиликата полученного из отходов руды слюдяного сланца. Сравнительный анализ водонасыщения образцов пеносиликата при кратковременных и длительных испытаниях показал, что влагоемкость модифицированного материала в два раза и более ниже, чем влагоемкость необработанных образцов. Определение нефтеемкостных характеристик свидетельствует о высокой сорбционной емкости по отношению к нефтепродуктам, до 23 % для водонасыщенных образцов. Максимальная нефтемкость неводонасыщенных образцов модифицированных мазутом составила 192 %, модифицированных парафином 198 %.

Установлена специфика кинетических кривых влагопоглощения и нефтепоглощения для пеносиликатных материалов. Дано обоснование характера кинетических зависимостей, обусловленное изменением пористой структуры материала и его удерживающей способности по отношению к воде и дизельному топливу.

Сравнительный анализ алюмосиликатных сорбентов нефтепродуктов показал, что модифицированный пеносиликат по своим сорбционным характеристикам сопоставим с модифицированным вспученным перлитом, который достаточно успешно используется для очистки водных объектов, загрязненных нефтепродуктами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Asadpour R., Sapari N.B., Tuan Z.Z., Jusoh H., Riahi A., Uka O.K. Application of Sorbent materials in Oil Spill management: A review // *Caspian journal of Applied Sciences Research*. 2013. N 2. P. 46–58.
2. Rotar O.V., Iskrizhitskaya D.V., Iskrizhitsky A.A., Oreshina A.A. Cleanup of water surface from oil spills using natural sorbent materials // *Procedia Chemistry*. 2014. N 10. P. 145–150.
3. Bandura L., Wozzuk A., Kołodynska D., Wojciech Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review // *Minerals*. 2017. Vol. 7, iss. 37. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/min7030037>
4. Acevedo Cortez J.S., Kharisov B.I., Serrano Quezada Th.E. Micro- and nanoporous materials capable of absorbing solvents and oils reversibly: the state of the art // *Petroleum Science*. 2017. N 14. P. 84–104.
5. Patalano A., Villalobos F., Pena P., Jauregui E. Scaling sorbent materials for real oil-sorbing applications and environmental disasters // *MRS Energy & Sustainability*. 2019. N 7. P. 1–13. DOI:10.1557/mre.2019.3
6. Губкина Т.Г., Беляевский А.Т., Маслобоев В.А. Способы получения гидрофобных сорбентов нефти модификацией поверхности вермикулита органосилоксанами // *Вестн. МГТУ*. 2011. Т. 14, № 4. С. 767–773.

7. Фокина Н.В. Перспективы использования сорбентов различной модификации при очистке природных сред от нефтепродуктов в условиях Кольского Севера // Вестн. МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 101–108. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-101-108
8. Su-Jin Park, Young-Bo Kim, Sang-Do Yeo. Vapor adsorption of volatile organic compounds using organically modified clay // *Separation science and technology*. 2008. Vol. 43. P. 1174–1190. DOI: 10.1080/01496390801910138
9. Варданын М.А. Гидрофобизация вспученного перлита синтетическими полимерными материалами и изучение его сорбционных свойств // Вода и экология. 2017. № 2. С. 50–59. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.20.2.50–59
10. Gürsoya M., Karaman M. Hydrophobic coating of expanded perlite particles by plasma polymerization // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 284. P. 343–350. DOI:10.1016/j.cej.2015.09.007
11. Месяц С.П., Остапенко С.П. Изменение морфологии поверхности вермикулита для получения сорбентов нефти на его основе // Вестн. МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 747–750.
12. Коган В.Е., Згонник П.В., Ковина Д.О., Черняев В.А. Использование пеностекла и полимерных материалов в качестве эффективных нефтесорбентов // *Стекло и керамика*. 2013. № 12. С. 3–7.
13. Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Юдаков А.А., Кисель А.А., Павлов В.Ф. Экспериментальное получение олеофильных материалов на основе отходов рудного сырья // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 6. С. 99–108.
14. Павлов В.Ф. Физические основы технологии получения новых материалов с заданными свойствами на основе создания системы комплексного использования техногенного и нерудного сырья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 196 с.
15. Pavlov V.F., Yudakov A.A., Shabanova O.V., Pavlov M.V. Pyrometallurgical processing of the hydromica schist with producing foam materials // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, N 3. P. 337–343.
16. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A. Development of technology of producing the hydrophobic aluminosilicate sorbents for cleaning of water objects from organic pollutions // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, N 4. P. 535–545.

REFERENCES

1. Asadpour R., Sapari N.B., Tuan Z.Z., Jusoh H., Riahi A., Uka O.K. Application of Sorbent materials in Oil Spill management: A review. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*. 2013;(2):46-58.
2. Rotar O.V., Iskrizhitskaya D.V., Iskrizhitsky A.A., Oreshina A.A. Cleanup of water surface from oil spills using natural sorbent materials. *Procedia Chemistry*. 2014;(10):145-150. DOI:10.1016/j.proche.2014.10.025
3. Bandura L., Wozuk A., Kołodynska D., Wojciech Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review. *Minerals*. 2017;7(37):1-25. DOI:10.3390/min7030037
4. Acevedo Cortez J.S., Kharisov B.I., Serrano Quezada Th.E. Micro- and nanoporous materials capable of absorbing solvents and oils reversibly: the state of the art. *Petroleum Science*. 2017;(14):84-104. DOI:10.1007/s12182-016-0143-0
5. Patalano A., Villalobos F., Pena P., Jauregui E. Scaling sorbent materials for real oil-sorbing applications and environmental disasters. *MRS Energy & Sustainability*. 2019;(7):1-13.
6. Gubkina T.G., Belyaevsky A.T., Masloboev V.A. Sposoby polucheniya gidrofobnykh sorbentov nefi modifikatsiyey poverkhnosti vermikulita organosiloksanami. *Vestnik of the MGTU*. 2011;14(4):767-773. (In Russ.).
7. Fokina N.V. Perspektivy ispol'zovaniya sorbentov razlichnoy modifikatsii pri ochestke prirodnykh sred ot nefteproduktov v usloviyakh Kol'skogo Severa. *Vestnik of the MGTU*. 2019;22(1):101-108. (In Russ.).
8. Su-Jin Park, Young-Bo Kim, Sang-Do Yeo. Vapor adsorption of volatile organic compounds using organically modified clay. *Separation science and technology*. 2008;43:1174-1190.
9. Vardanyan M.A. Gidrofobizatsiya vspuchennogo perlita sinteticheskimi polimernymi materialami i izucheniye yego sorbtsionnykh svoystv. *Voda i ekologiya*. 2017;(2):50-59. (In Russ.).
10. Gürsoya M., Karaman M. Hydrophobic coating of expanded perlite particles by plasma polymerization. *Chemical Engineering Journal*. 2016;284:343–350.
11. Mesyats S.P., Ostapenko S.P. Izmeneniye morfologii poverkhnosti vermikulita dlya polucheniya sorbentov nefi na yego osnove. *Vestnik of the MGTU*. 2009;12(4):747-750. (In Russ.).

12. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chernyaev V.A. Ispol'zovaniye penostekla i polimernykh materialov v kachestve effektivnykh neftesorbentov. *Steklo i keramika*. 2013;(12):3-7. (In Russ.).
13. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A., Pavlov V.F. Eksperimental'noye polucheniye oleofil'nykh materialov na osnove otkhodov rudnogo syr'ya. *Vestnik of the FEB RAS*. 2020;(6):99-108. (In Russ.).
14. Pavlov V.F. Fizicheskiye osnovy tekhnologii polucheniya novykh materialov s zadannymi svoystvami na osnove sozdaniya sistemy kompleksnogo ispol'zovaniya tekhnogennogo i nerudnogo syr'ya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN; 2005. 196 p. (In Russ.).
15. Pavlov V.F., Yudakov A.A., Shabanova O.V., Pavlov M.V. Pyrometallurgical processing of the hydromica schist with producing foam materials. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019;6(3):337-343.
16. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A. Development of technology of producing the hydrophobic aluminosilicate sorbents for cleaning of water objects from organic pollutions. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019;6(4):535-545.