

Научная статья

УДК 66.067.8.081.3

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_232_06_11

EDN: LFABCN

Регенерация олеофильных алюмосиликатных сорбентов: технологический процесс, аппаратурное оформление

О.Н. Цыбульская[✉], Т.В. Ксеник, А.А. Юдаков

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

tksenik2609@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>

Аннотация. Рассмотрены результаты исследования технологии регенерации сорбентов нефти и нефтепродуктов после отработки ими своего ресурса. Предложены технологическая схема регенерации и ее аппаратурное оформление, позволяющие за один этап очистить отработанный сорбент (на основе керамзита, перлита, вермикулита, пеносиликата) от углеводородов и повторно его модифицировать. Установлены оптимальные температурные режимы процессов регенерации по разработанной технологии. Определение нефтеёмкостных характеристик регенерированных сорбентов свидетельствует о сохранении ими сорбционной емкости по отношению к нефтепродуктам. Преимуществами разработанной технологии восстановления свойств сорбента являются простота в осуществлении и экономическая рациональность. Полученные результаты открывают возможность широкого применения разработанного способа регенерации для восстановления свойств отработанных алюмосиликатных сорбентов.

Ключевые слова: сорбенты нефтепродуктов, керамзит, перлит, вермикулит, пеносиликат, пористая структура, регенерация, опытно-промышленная установка, нефтеёмкость, олеофильность, модифицирующая обработка, углеводороды

Для цитирования: Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Юдаков А.А. Регенерация олеофильных алюмосиликатных сорбентов: технологический процесс, аппаратурное оформление // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 6. С. 124–134. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_232_06_11.

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

Original article

Regeneration of oleophilic aluminosilicate sorbents: technological process, equipment design

O.N. Tsybul'skaya, T.V. Ksenik, A.A. Yudakov

Oksana N. Tsybul'skaya

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>

Abstract. The article explores the results of a study on the technology of regeneration of oil and petroleum product sorbents after they have exhausted their resources.

A technological scheme of regeneration, optimal temperature modes of the processes and its equipment design have been proposed, allowing cleaning the spent sorbent (based on expanded clay, perlite, vermiculite and foam silica) from hydrocarbons and modifying it for reuse in a single processing stage. Deoxidized sorbents preserve its oil capacity characteristics. The advantage of the developed technology for restoring sorbent properties is its simplicity of implementation and economic rationality. The obtained results open up the possibility of wide application of the developed method of regeneration for restoring properties of spent aluminosilicate sorbents.

Keywords: sorbents for petroleum products, expanded clay, perlite, vermiculite, foam silica, porous structure, regeneration, pilot plant, oil capacity, oleophilicity, modifying treatment, hydrocarbons

For citation: Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A. Regeneration of oleophilic aluminosilicate sorbents: technological process, equipment design. *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(6):124-134. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_232_06_11.

Введение

Нефтяная отрасль по-прежнему остается одной из основных отраслей российской экономики, формирующей бюджет страны. Развитие нефтедобычи и нефтепереработки предопределяет широчайшее применение органических веществ, включая нефтепродукты, в самых разных производствах, а также на транспорте. Вместе с тем ужесточающиеся экологические требования вызывают необходимость решения проблем защиты окружающей среды, мотивируют внедрение новых эффективных методов очистки водных объектов от органических загрязнений, в том числе разработку современных сорбционных материалов.

В настоящей публикации отражены некоторые результаты работ, проводимых в Институте химии ДВО РАН и направленных на создание новых сорбентов, их эффективное использование, включая регенерацию.

Авторами статьи был разработан ряд эффективных, пригодных для практического использования сорбентов для очистки водных объектов от нефтезагрязнений [1]. Основой полученных сорбентов являлись пористые алюмосиликатные материалы природного и искусственного происхождения. Алюмосиликатные сорбенты отличаются высокими показателями адсорбционной емкости, олеофильности, гидрофобности, обладают хорошей плавучестью, химической и термической стойкостью. Помимо перечисленных свойств преимущества сорбентов определяются возможностью их регенерации с восстановлением исходных свойств и последующего многократного применения.

Авторами статьи была испытана технология регенерации олеофильного сорбента, полученного на основе вспученного перлита [2]. Метод регенерации отработанного сорбента заключается в его обжиге при температуре 500 °С в рабочей камере установки, предназначенной для первичного получения сорбента. Обжиг производится с целью удаления с поверхности сорбента адсорбированных нефтепродуктов. После обжига рабочую камеру установки с загруженным сорбентом герметизируют, вакуумируют, создавая разрежение 0,2–0,5 атм., и подают в нее подготовленный модификатор, который при высокой температуре переходит в газообразное состояние. При этом в камере создается избыточное давление. Под его воздействием модификатор проникает в открытые поры гранул перлита и формирует на их стенках сплошную органическую пленку за счет процессов химической и физической адсорбции образовавшихся при испарении модификатора газообразных углеводородных соединений. Процесс осуществляется при охлаждении рабочей камеры без ее разгерметизации. Основные этапы технологии регенерации представлены на рис. 1, а.

Регенерация сорбента по описанной технологической схеме требует длительного времени обработки, так как включает два этапа: обжиг сорбента для подготовки поверхности с открытыми порами к нанесению олеофильной пленки и повторную модификацию. Кроме того, создаваемое избыточное давление в рабочей камере требует соблюдения мер повышенной безопасности и контроля давления, что связано с необходимостью установки подрывного клапана и, соответственно, с усложнением аппаратного оформления технологии.

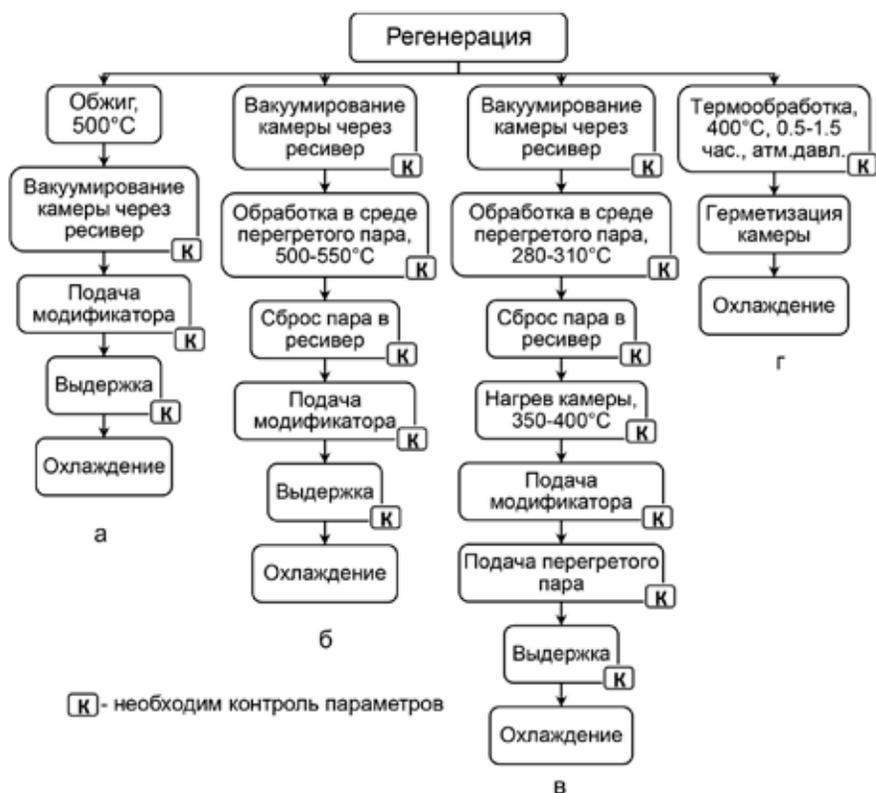


Рис. 1. Технологические схемы регенерации отработанных сорбентов нефтепродуктов

В работе [3] для восстановления свойств отработанных пористых алюмосиликатных сорбентов регенерация осуществляется с помощью установки, используемой для получения сорбентов. По предложенной авторами схеме технологические операции проводятся в той же последовательности, что и при изначальном получении сорбента (рис. 1, б). Отработанный сорбент загружают в рабочую камеру установки, камеру вакуумируют до остаточного давления 10–60 кПа. Обрабатывают сорбент в среде перегретого пара, который образуется в кювете-испарителе, размещенной в рабочей камере. Для этого температуру повышают до 500–550 °С и контролируют давление в камере. В случае увеличения давления выше атмосферного сбрасывают пар. Выдержку при заданной температуре осуществляют в течение 2–3 ч. Затем окончательно сбрасывают пар из рабочей камеры в предварительно вакуумированный ресивер до остаточного давления 1–20 кПа и в рабочую камеру подают предварительно подготовленный модификатор в жидкой фазе, выдерживают в течение 5–20 мин и отключают нагрев, оставляя материал в загерметизированной камере до охлаждения. Регенерация сорбента согласно представленному методу требует существенных дополнительных энергозатрат на создание высокой температуры и поддержание ее длительное время.

Авторы работы [4] предлагают аналогичную технологическую схему регенерации сорбента с той лишь разницей, что обработку в среде перегретого пара осуществляют при температурах 280–310 °С (рис. 1, в). Кроме того, на этапе охлаждения рабочей камеры с целью создания благоприятных условий для конденсации паров модифицирующего вещества в кювету-испаритель, расположенную в верхней части камеры, вносят воду. Это позволяет повысить давление в камере

до 80–100 кПа и создать благоприятные условия для конденсации модифицирующего вещества. Но в данном случае нужно учитывать, что для получения оптимального результата целесообразно в качестве модифицирующего вещества использовать тяжелые дистиллятные нефтепродукты.

Очевидно, что невысокая температура нагрева (280–310 °С) на первом этапе обработки не обеспечивает эффективного удаления адсорбированных нефтепродуктов, в особенности их тяжелых фракций, из пор отработанного сорбента. Недостаточно тщательная подготовка алюмосиликатного материала к нанесению олеофильного покрытия приводит к снижению качества регенерированного сорбента.

Существенным недостатком технологических схем регенерации, представленных на рис. 1, *а–в*, является необходимость использования дополнительного оборудования (объемного ресивера, вакуумного насоса и др.). Для эффективного сброса пара объем ресивера должен превосходить рабочий объем камеры с регенерируемым сорбентом, также для вакуумирования ресивера необходим вакуумный насос. Кроме того, для контроля давления в камере на этапе обработки перегретым водяным паром и последующей обработки при подаче модификатора необходимы дополнительное аппаратное оформление для соблюдения мер безопасности и приборы для контроля параметров процесса регенерации.

Помимо длительного времени обработки недостатками всех описанных выше технологий являются дополнительный расход модифицирующего вещества для повторной модификации сорбента и необходимость средств для его подготовки и подачи в рабочую камеру.

Цели настоящей работы – разработка эффективного способа восстановления свойств отработанных сорбентов нефтепродуктов путем их регенерации методом термохимической модификации в парогазовой фазе углеводородов, разработка аппаратуры и технологической схемы регенерации, экспериментальное определение оптимальных температуры и продолжительности процесса, сравнение характеристик первично модифицированных и регенерированных сорбентов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования (табл. 1) были выбраны образцы неорганических пористых алюмосиликатных материалов: керамзита, вспученных перлита и вермикулита. В ранее проведенных работах авторами была изучена возможность получения сорбентов на их основе [1]. Также для проведения испытаний были отобраны образцы рентгеноаморфного гранулированного пеносиликата, представляющие собой легкие, сыпучие гранулы с развитой системой открытых и закрытых пор. Этот материал был получен при переработке отходов руды слюдяного сланца в КНЦ СО РАН на универсальном комплексе переработки техногенного сырья [5].

Авторы статьи [6] показали целесообразность использования гранулированного пеносиликата в качестве основы для получения олеофильных сорбентов. В [7] представлены результаты исследования методов модифицирующей обработки и свойств модифицированного пеносиликата, в том числе его высокой сорбционной способности по отношению к нефтепродуктам.

На основе представленных образцов были получены модифицированные сорбенты нефтепродуктов. Технология производства сорбентов и рациональное

Образцы сорбционных материалов

Характеристика	Керамзит	Перлит	Вермикулит	Пеносиликат
Происхождение	Сибирцевский комбинат строительной индустрии	Начикинское месторождение, Камчатка	Кокшаровское месторождение, Приморский край	Красноярский научный центр СО РАН
Фракционный состав, мм	20,0–40,0	3,0–4,0	1,5–5,0	2,0–8,0
Насыпная плотность, кг/м ³	300–350	126	100–135	70–150
ГОСТ	9757–90	10832–09	12865–67	Опытное производство

аппаратурное оформление были разработаны авторами статьи и подробно описаны в работах [1, 8]. Модифицирование поверхности пористых природных и искусственных алюмосиликатов осуществляется путем их химико-термической обработки неполярными углеводородами. Технология включает два основных этапа обработки – обжиг исходного сырьевого материала и его модификацию, то есть нанесение покрытия на открытую поверхность пор сырья. Формирование покрытия происходит в условиях перепада давления в процессе охлаждения материала. Причем различные режимы обработки отличаются механизмом формирования покрытия на поверхности. Для высокотемпературных режимов (500–550 °С) характерен каталитический крекинг, протекающий на поверхности разогретого алюмосиликатного материала, при низкотемпературных режимах (350–400 °С) покрытие формируется за счет конденсации из газовой фазы [9].

Олеофильные сорбенты, полученные по разработанной технологии, отличаются высокими нефтеемкостными характеристиками и параметрами олеофильности, соответствуют всем требованиям, предъявляемым к сорбентам для очистки сточных вод, а также для сбора разлитых нефтепродуктов.

Эксперимент

Для проведения экспериментов по регенерации использовали образцы отработанных сорбентов, содержащих дизельное топливо, поглощенное ими в процессе очистки загрязненной воды. Для восстановления сорбционных свойств образцы подвергали регенерации методом термической высокотемпературной обработки и дальнейшей реактивации сорбента в газовой фазе углеводородных соединений при разрежении. Регенерацию осуществляли в условиях, приближенных к условиям получения сорбента. Для изучения и отработки режимов регенерации использована установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

Отработанный алюмосиликатный сорбент загружали на поддоны и помещали в рабочую камеру установки для проведения термообработки (обжига). Для выяснения рациональных режимов регенерации были проведены эксперименты в диапазоне температуры от 300 до 550 °С. Время обработки составляло 0,5–1 ч и в большой степени зависело от степени загрузки камеры. Результаты показали, что оптимальным является режим обработки при 350–400 °С, так как при указанной температуре обеспечивается полное удаление из пор сорбента адсорбированных нефтепродуктов, в том числе их тяжелых фракций.

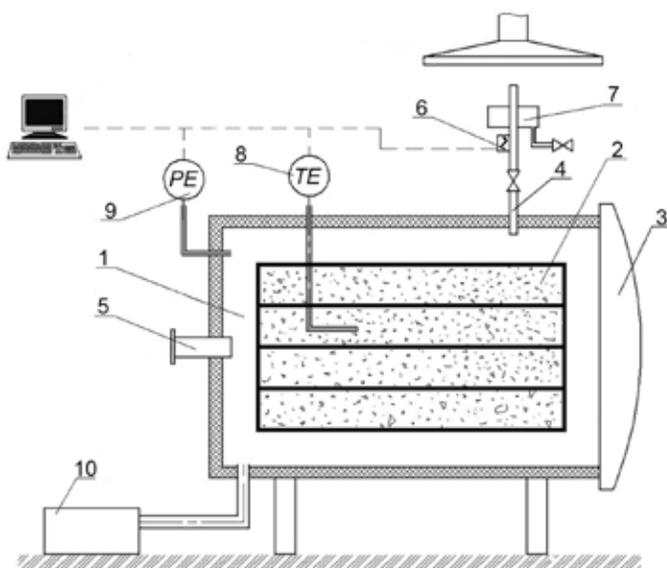


Рис. 2. Схема установки для регенерации сорбентов: 1 – камера термообработки (рабочая камера), 2 – подлежащий регенерации отработанный сорбент, 3 – дверца камеры с уплотнителем, 4 – технологический патрубок для сброса газифицированных углеводородов, 5 – патрубко-конденсатор, 6 – датчик-дымоуловитель, 7 – конденсатор для сбора газифицированных углеводородов, 8 – датчик температуры, 9 – датчик давления, 10 – емкость для сбора конденсата

При первичной модификации пористых алюмосиликатов необходимо более длительное прокаливание сырья при температурах 450–550 °С. Эта операция проводится для того, чтобы физико-механически и физико-химически связанная влага, содержащаяся в открытых порах и капиллярах, была полностью удалена и не препятствовала формированию сплошной олеофильной пленки на поверхности.

В данном случае при проведении регенерации сорбента нет необходимости проводить длительное прокаливание и использовать высокие температуры, как при первичной модификации, так как отработанный сорбент изначально уже олеофилен и не содержит химически и механически связанной влаги, а сохраняет только свободную влагу в открытых порах, которая легко удаляется в процессе термообработки в интервале температур 350–400 °С.

Нагрев регенерируемого сорбента в ходе термообработки проводится при атмосферном давлении без герметизации рабочей камеры. Для того, чтобы не создавать избыточное давление в рабочей камере 1, технологический патрубок 4, расположенный в ее верхней части, оставляют открытым. В процессе нагрева происходит десорбция нефтепродуктов с поверхности частиц отработанного сорбента. При этом газифицированные углеводороды частично отводятся через технологический патрубок 4 в конденсатор 7, предназначенный для их сбора, и там накапливаются для последующей утилизации. Частично происходит их конденсация на более холодных поверхностях камеры: в патрубко-конденсаторе 5, предусмотренном на задней стенке рабочей камеры, а также на внутренней поверхности охлаждаемой дверцы 3 рабочей камеры. Нужно отметить, что сконденсированные углеводороды могут в дальнейшем использоваться в качестве модифицирующих веществ при получении сорбентов.

Окончание процесса активной десорбции фиксируют при помощи датчика-дымоуловителя 6. После этого герметизируют камеру, перекрывают технологический патрубок 4 для отвода газов и отключают нагрев. Сорбент выдерживают в герметично закрытой рабочей камере, снижая ее температуру до 25–30 °С.

Далее камеру подключают к магистрали водяного охлаждения. Вследствие снижения температуры в рабочей камере активно конденсируются оставшиеся

газифицированные пары в конденсаторе 5 и на дверце 3 камеры. При одновременном охлаждении (медленном, 20–25 °С/ч) и конденсации в герметично закрытой камере образуется разрежение. Температура газообразования в значительной мере зависит от давления: вследствие падения давления снижается температура образования газовой фазы углеводородов, конденсирующихся в рабочей камере; их последующее частичное испарение незначительно снижает разрежение в камере. То есть в объеме камеры устанавливается равновесие, характеризующееся зависимостью температуры испарения углеводородов от давления. Вследствие чего камера наполняется рабочим газом, который контактирует с активной поверхностью прокаленного сорбента. Этот газ представляет собой смесь углеводородов, образующихся при термическом разложении углеводородных цепочек модификатора. В качестве модифицирующего вещества при первичном получении сорбента использовали мазут марки М-100. К рабочему газу дополнительно добавляются газифицированные углеводороды из термически разлагаемого нефтепродукта, поглощенного поверхностью сорбента в процессе очистки. В случае данного эксперимента это дизельное топливо.

При условии соблюдения описанной выше последовательности операций при регенерации сорбента в камере установки формируется атмосфера непредельных углеводородных соединений, которые, будучи в газообразном состоянии, при дальнейшем охлаждении проникают в открытые поры и капилляры сорбента и образуют на стенках пор сплошное органическое покрытие (олеофильную пленку). Покрытие постепенно дестраивается в процессе охлаждения камеры без разгерметизации. По окончании процесса охлаждения при температуре в камере 25–30 °С разрежение по показаниям мановакуумметра составляет 10–30 кПа.

Таким образом, регенерировать сорбент по разработанной технологической схеме (см. рис. 1, 2) можно просто и эффективно, так как не требуется отдельного этапа обжига отработанного сорбента для десорбции адсорбированных нефтепродуктов. Также нет необходимости в дополнительном расходе модификатора, и, следовательно, исключается его предварительная подготовка. Кроме того, регенерация осуществляется без создания избыточного давления или разрежения в рабочей камере, поэтому не нужны вакуумный насос для создания разрежения, а также оборудование для контроля давления на всех этапах обработки.

Свойства регенерированных сорбентов оценивали по значениям краевого угла смачивания и сорбционной емкости по отношению к нефтепродуктам. Для определения краевого угла смачивания методом сидящей капли измеряли угол между твердой горизонтальной поверхностью и поверхностью капли в точке контакта трех фаз. Изображение капли обрабатывали с помощью программы «КОМРАС». Сорбционную емкость образцов определяли по специально разработанной весовой методике с фиксированием массы образца через определенные промежутки времени по разнице масс исходного и насыщенного нефтепродуктом образца. Подробное описание методики и оценка погрешности измерений представлены авторами в статье [6]. В качестве модельного нефтепродукта было выбрано дизельное топливо с диапазоном плотности 0,820–0,870 г/см³.

Результаты показали, что основные свойства однократно регенерированных сорбентов не уступают первично модифицированным образцам. Краевой угол после второй и третьей регенерации практически не изменился. Нефтеемкость сорбентов сохранила высокие показатели, за исключением нефтеемкости регенерированного сорбента на основе перлита (табл. 2).

Сравнительная оценка регенерированных сорбентов по отношению к первично модифицированным

Сорбент	Краевой угол, °	Сорбционная емкость по дизельному топливу через 100 ч испытаний, %
Модифицированные алюмосиликаты		
Керамзит	90–93	35
Вспученный перлит	102–105	222
Вспученный вермикулит	118–120	205
Пеносиликат	144–147	86
Регенерированные алюмосиликаты		
Керамзит	91–92	32
Вспученный перлит	100–105	154
Вспученный вермикулит	118–122	202
Пеносиликат	144–145	88

Самую высокую степень нефтепоглощения показали первично модифицированные образцы на основе перлита и вермикулита (рис. 3, *а*), что объясняется свойствами материала сорбента, их высокой пористостью и хорошей удерживающей способностью. Однократно регенерированные сорбенты были испытаны в течение 150 ч. Нефтепоглощение образцов на основе пеносиликата, керамзита, вермикулита изменилось незначительно (рис. 3, *б*). Образцы регенерированного сорбента на основе перлита при первых замерах после 3 ч испытаний показали снижение нефтепоглощения на 63 % относительно первично модифицированных. После 100 ч испытаний нефтепоглощение составило 154 % для регенерированных образцов (в сравнении с 222 % для первично модифицированных образцов). Такое значительное снижение нефтепоглощения связано с высокой хрупкостью зерен вспученного перлита, которые частично разрушаются в процессе испытаний. Механическое разрушение материала приводит к изменению его пористой структуры и, соответственно, к снижению нефтепоглощения и удерживающей способности регенерированного сорбента на основе перлита.

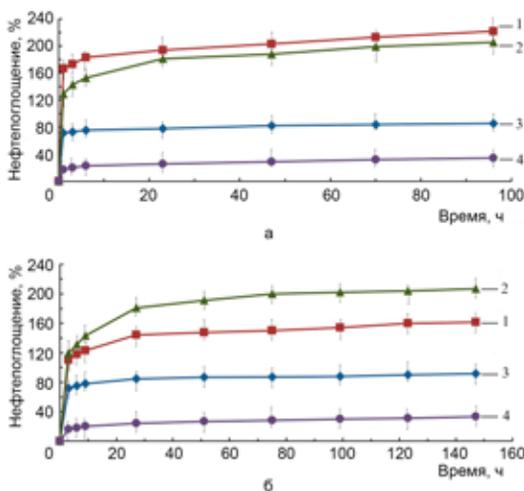


Рис. 3. Нефтепоглощающая способность первично модифицированного (*а*) и однократно регенерированного (*б*) сорбента. 1 – перлит, 2 – вермикулит, 3 – пеносиликат, 4 – керамзит

Изменение нефтепоглощающей способности сорбентов при длительных испытаниях представлено на рис. 3.

Регенерированный сорбент на основе вермикулита сохраняет высокую нефтепоглощающую способность, так как, в отличие от перлита, гранулы вермикулита обладают упругой деформацией и не разрушаются в процессе испытаний. Объемно пористая структура сорбента на основе пеносиликата и керамзита в процессе испытаний не изменилась, нефтепоглощающая способность регенерированного сорбента практически не снизилась.

Заключение

Проведенные эксперименты подтвердили преимущества разработанной технологии регенерации отработанных сорбентов на основе керамзита, перлита, вермикулита и пеносиликата. Предлагаемая технологическая схема позволяет осуществить регенерацию быстро и экономически целесообразно, так как значительно упрощается аппаратное оформление процесса, отсутствуют затраты на дополнительный расход модификатора, энергозатраты на обработку при избыточном давлении или на вакуумирование. Что важно – данная технология безопасна и обеспечивает высокое качество регенерации сорбента.

Изучение влияния различных режимов на восстановление его сорбционных свойств показало, что регенерация при температурах 350–400 °С дает наилучший результат, при этом достигается высокая степень очистки от углеводородов и восстанавливается сорбционная емкость.

Оценка качества регенерированных сорбентов показала, что сорбенты на основе керамзита, вермикулита, пеносиликата после трехкратной регенерации сохраняют высокую нефтеемкость по отношению к дизельному топливу. Сорбент на основе перлита после трехкратной регенерации снижает степень нефтепоглощения до 1,16 г/г после 50 ч испытаний, при этом сохраняя очень высокие показатели по сравнению с сорбентами на основе керамзита и пеносиликата. Такое снижение нефтепоглощающей способности не связано с технологическими режимами регенерации, а обусловлено механическим разрушением сорбента при испытаниях.

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения 1) нового способа регенерации для восстановления свойств отработанных сорбентов, 2) предложенного выше аппаратного оформления. Разработанная технология отличается простотой, безопасностью и обеспечивает высокое качество регенерированных сорбентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Кисель А.А., Юдаков А.А., Мялов С.В. Оптимизация технологии получения гидрофобных алюмосиликатных сорбентов // *Вестн. ДВО РАН*. 2018. № 5. С. 130–137.
2. Yudakov A.A., Ksenik T.V., Tsybul'skaya O.N., Kisel A.A. Instrumentation and features of producing the oleophilic sorbent on the perlite basis // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. Vol. 8, N 1. P. 103–113.
3. Волков Д.А., Чириков А.Ю., Буравлев И.Ю., Дарьевич Д.Н., Юдаков А.А., Перфильев А.В. Способ получения гидрофобного нефтесорбента и устройство для его осуществления: пат. 2708309 РФ. Заявл. 26.03.2019; опубл. 5.12.2019, Бюл. № 34. 13 с.
4. Волков Д.А., Чириков А.Ю., Буравлев И.Ю., Дарьевич Д.Н., Юдаков А.А., Перфильев А.В. Способ получения гидрофобного нефтесорбента и устройство для его осуществления: пат. 2708362 РФ. Заявл. 26.03.2019; опубл. 5.12.2019, Бюл. № 34. 13 с.
5. 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.
6. 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.
7. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Pavlov M.V., Pavlov V.F. The research on the sorption properties of the X-ray amorphous silica foam // *Environmental Technology and Innovation*. 2021. Vol. 23. Art. number: 101567. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101567.

8. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A. Technology development for producing hydrophobic aluminosilicate sorbents to remove organic pollutants from water // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, N 4. P. 535–543.

9. Волков Д.А., Чириков А.Ю., Буравлев И.Ю., Перфильев А.В., Ярусова С.Б., Юдаков А.А. Газофазная тонкослойная гидрофобизация алюмосиликатов в газовой среде углеводородов // *Химическая технология*. 2019. № 14. С. 647–651.

REFERENCES

1. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Kisel A.A., Yudakov A.A., Myalov S.V. Optimizatsiya tekhnologii polucheniya gidrofobnykh aluminosilikatnykh sorbentov. *Vestnik of the FEB RAS*. 2018;(5):130-137. (In Russ.).

2. Yudakov A.A., Ksenik T.V., Tsybul'skaya O.N., Kisel A.A. Instrumentation and features of producing the oleophilic sorbent on the perlite basis. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021;8(1):103-113.

3. Volkov D.A., Chirikov A.Yu., Buravlev I.Yu., Dar'evich D.N., Yudakov A.A., Perfilyev A.V. Spособ polucheniya gidrofobnogo neftesorbenta i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya: pat. 2708309 RF. Zayav. 26.03.2019; opubl. 5.12.2019, Bul. 34. 13 s. (In Russ.).

4. Volkov D.A., Chirikov A.Yu., Buravlev I.Yu., Dar'evich D.N., Yudakov A.A., Perfilyev A.V. Spособ polucheniya gidrofobnogo neftesorbenta i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya: pat. 2708362 RF. Zayav. 26.03.2019; opubl. 5.12.2019, Bul. 34. 13 s. (In Russ.).

5. Pavlov V.F. Fizicheskiye osnovy tekhnologii polucheniya novykh materialov s zadannymi svoystvami na osnove sozdaniya sistemy kompleksnogo ispol'zovaniya tekhnogennoy i nerudnoy syr'ya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN; 2005. 196 s. (In Russ.).

6. 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.).

7. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Pavlov M.V., Pavlov V.F. The research on the sorption properties of the X-ray amorphous silica foam. *Environmental Technology and Innovation*. 2021;23:101567. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101567.

8. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A., Kisel A.A. Technology development for producing hydrophobic aluminosilicate sorbents to remove organic pollutants from water. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019;6(4):535-543.

9. Volkov D.A., Chirikov A.Yu., Buravlev I.Yu., Perfilyev A.V., Yarusova S.B., Yudakov A.A. Gazofaznaya tonkosloynaya gidrofobizatsiya aluminosilikatov v gazovoy srede uglevodородov. *Chemical Technology*. 2019;14:647-651. (In Russ.).

