

АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

© А. М. Сербиновский¹, М. Ю. Сербиновский¹, О. В. Попова^{2,*}

¹ Южный федеральный университет,
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

² Донской государственный технический университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1

* E-mail: olvp2808@rambler.ru

Поступила в Редакцию 3 мая 2023 г.

После доработки 15 ноября 2023 г.

Принята к публикации 3 декабря 2023 г.

Исследованы адсорбционные свойства порошковых и композиционных сорбентов в процессах сорбции из растворов малой концентрации на примере растворов уксусной кислоты и сорбции масел на примере вазелинового масла и промышленного продукта масло МС-20. Сорбенты изготовлены на основе терморасширенного графита, полученного из гидролизного лигнина с применением термических и электрохимических технологий. Доказана высокая адсорбционная эффективность терморасширенного графита и его способность к регенерации после сорбции из растворов. Изучено влияние плотности композиционных сорбентов на сорбционную способность по отношению к маслам. Получено уравнение для расчета коэффициента маслопоглощения при выдержке различной длительности композиционных сорбентов в маслах, рассчитаны численные значения констант данного уравнения, определяемых плотностью сорбента и природой масла.

Ключевые слова: композиционный сорбент; порошковый сорбент; графит из лигнина; терморасширенный графит; адсорбционные свойства; масла; маслопоглощение

DOI: 10.31857/S0044461823050043; EDN: RMRGMQ

Терморасширенный графит, обладая нанослоистой структурой и большой удельной поверхностью, потенциально превосходит современные промышленные сорбенты. Сорбенты на основе графеновых наноматериалов могут быть использованы в процессах фильтрации, водоподготовки, осушки газов [1, 2]. Оксид нанографита и другие модификации терморасширенных графитов, полученных из природных графитов, исследованы в качестве сорбентов нефти и жидких углеводородов с поверхности воды. Благодаря макропористой структуре и гидрофобным свойствам терморасширенные графиты имеют высо-

кую сорбционную емкость по нефтепродуктам в водных растворах, которая достигает $67 \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ сорбента при степени извлечения 99% [3, 4].

Оксиды нанографита, полученные электрохимическим расслоением терморасширенного графита, имеют развитую гетерогенную поверхность с активными разнородными энергетическими центрами, что способствует эффективной адсорбции [5].

Цель работы — исследование адсорбционных свойств терморасширенного графита, полученного из гидролизного лигнина, и композиционных сорбентов на его основе.

Экспериментальная часть

Основными материалами для исследования являлись графит, полученный из гидролизного лигнина, бисульфат графита и терморасширенный графит. Графит получали графитированием в течение 1 ч при температуре 2800°C углеродного материала, полученного термолизом гидролизного лигнина листовых пород древесины (ООО «Кировский биохимический завод») в графитовом контейнере при температуре 600°C без доступа воздуха [6]. Полученный графит диспергировали в 10 М растворе H₂SO₄ (х.ч., АО «ЛенРеактив») (объемное соотношение графит: 10 М H₂SO₄ составляло 1:2) и подвергали электрохимическому окислению по методике [7]. Электродами служила нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (АО «Металлургический завод Электросталь»). Потенциал ~1.5 В (отн. Ag, AgCl/KCl_{нас}) накладывали с помощью потенциостата Р-301 (ООО «Элинс»). В результате синтеза получали бисульфат графита. Для получения терморасширенного графита бисульфат графита нагревали в течение 5–10 с при температуре 750–900°C. Терморасширенный графит исследовали в качестве порошкового сорбента.

Насыпная плотность терморасширенного графита (ρ), определенная по методике,* составляла 2–2.5 г·дм⁻³, размер частиц (d) — менее 45 мкм (форму частиц условно принимали круглой). Удельную поверхность частиц терморасширенного графита ($S_{уд}$) рассчитывали по формуле

$$S_{уд} = \frac{6}{d\rho}. \quad (1)$$

Рассчитанная удельная поверхность частиц терморасширенного графита (величина учитывает только внешнюю поверхность частиц и не учитывает поверхность внутренних пор) составляет 55–300 м²·г⁻¹.

Пасты для формования заготовок композиционных сорбентов получали путем смешения 15–20 мас%-ного водного раствора Na-карбоксиметилцеллюлозы (ООО «Завод Карбоцел») и бисульфата графита в соотношении бисульфат графита — 90–94 мас%, Na-карбоксиметилцеллюлоза — 6–10 мас% по сухому веществу. Заготовки для композиционного сорбента получали путем односторонней или двухсторонней намазки или накатки 0.2 г пасты на основе бисульфата графита на подложки из металлической проволочной тканой сетки из никеля НП2 (ООО

«КольчугМетПром») с квадратными ячейками (диаметр проволоки 0.036 мм, размер ячейки в свету 0.05 мм) площадью 50 × 50 мм.

Заготовки сушили и обрабатывали термически при 750–900°C между ограничивающими поверхностями, расстояние между которыми соответствовало заданной толщине композиционного сорбента. Для этого использовали комплект рамок из нержавеющей стали 12Х18Н10 (АО «Металлургический завод «Электросталь») с окном площадью 50 × 50 мм. Рамки выполнялись разъемными или неразъемными в зависимости от того, где помещалась армирующая сетка или сетки: на поверхности одной или обеих пластин или между частями разъемной рамки. Рамка могла использоваться в дальнейших исследованиях вместе с образцом, обеспечивая удобство его закрепления. При такой форме образца, малой толщине, армировании и ограничении его рамкой изменение его объема в ходе экспериментов происходит за счет изменения толщины, так как изменения размеров в сторону боковых граней образцов ограничивает рамка и (или) армирующая сетка. Соответственно при неизменности длины и ширины образца изменение его объема можно контролировать по изменению толщины образца — 0.5–10 мм (в готовом виде после термообработки).

Плотность композиционных сорбентов рассчитывали как отношение массы сорбента к объему полученного образца (с учетом армирующей сетки). Диапазон значений плотности композиционного сорбента был выбран экспериментально на основании результатов ранее проведенных исследований по критериям наименьшей плотности при достаточной механической прочности.

Сорбционные характеристики изучали на модельных объектах: раствор уксусной кислоты (х.ч., АО «ЛенРеактив»), масло МС-20 (ООО «ЛЛК-Интернешнл»), вазелиновое масло (АО «Медхим»). В качестве контрольного сорбента использовали порошок активированного угля ОУ-А (АО «Сорбент») с насыпной плотностью 240–280 г·дм⁻³ и размером частиц не более 100 мкм.

Поглотительную емкость сорбентов в маслах определяли весовым способом: образец взвешивали, помещали в масло на крупноячеистой сетке, выдерживали заданное время, затем вынимали образец на сетке, помещали сетку с образцом на фильтровальную бумагу для удаления избытка масла и повторно взвешивали. Взвешивание проводили на аналитических весах ВЛР-200 (ООО «Весмастер»). Коэффициент маслопоглощения (K , %) определяли как отношение массы масла к массе сорбента в композите.

* ГОСТ Р 58151.3–2018. Средства дезинфицирующие. Методы определения физико-химических показателей.

Набухание композиционных образцов оценивали по изменению объема сорбента. Образец сорбента фиксировали в рамке с открытой площадью 50×50 мм, которую помещали в стеклянную емкость и заливали маслом или разбавленным раствором уксусной кислоты. Так как размеры нанесенного на сетку сорбента 50×50 мм соответствовали размерам окна рамки, то площадь нанесенного сорбента до и после набухания принимали постоянной, а изменение объема сорбента определялось изменением его толщины. Толщину сорбента контролировали с помощью микрометрической головки типа МГ-15 (ООО ЮУИЗ «Калибр»). Степень набухания (α) рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{l}{l_0} - 1, \quad (2)$$

где l — толщина композиционного сорбента после контакта с маслом или раствором уксусной кислоты (мм), l_0 — исходная толщина сорбента (мм).

Для оценки адсорбционных свойств порошкового и композиционных сорбентов в модельных растворах 0.1 – 0.4 моль·л⁻¹ уксусной кислоты растворы с адсорбентом выдерживали заданное время (10–1440 мин), периодически перемешивая. Эффективность адсорбентов определяли по уменьшению концентрации уксусной кислоты в растворе после выдержки с адсорбентом. Концентрацию до и после адсорбции определяли методом кислотно-щелочного титрования. Титровали 0.2 моль·л⁻¹ раствором NaOH (х.ч., АО «ЛенРеактив»), индикатор — фенолфталеин (ч.д.а., ООО «Реахимприбор»). Образцы массой 1.5 г терморасширенного графита или активированного угля засыпали в колбы, содержащие по 20 мл 0.1 , 0.2 , 0.4 моль·л⁻¹ растворов уксусной кислоты, перемешивали в течение 10 мин и оставляли на определенное время, периодически взбалтывая, после чего содержимое каждой из колб отфильтровывали через бумажные фильтры. Количество адсорбированной CH_3COOH (X) рассчитывали в мг на 100 г сорбента по формуле (3), равновесную концентрацию кислоты (c) — по формуле (4):

$$X = \frac{(V_1 - V_2)V_{\text{УК}}M \cdot 100}{V_{\text{T}}m}, \quad (3)$$

$$c = \frac{MV_2}{V_{\text{T}}}, \quad (4)$$

где M — молярность NaOH, V_{T} — объем титруемого раствора, m — масса образца, $V_{\text{УК}}$ — объем раствора кислоты, V_1 — объем раствора NaOH на титрование

исходного раствора CH_3COOH , V_2 — объем раствора NaOH на титрование раствора CH_3COOH после адсорбирования.

Эффективность адсорбентов определяли как отношение количества адсорбированной CH_3COOH к исходному количеству в растворе (%).

Регенерацию порошковых сорбентов на основе терморасширенного графита проводили путем нагрева при 180°C в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ («Смоленское СКТБ СПУ») в течение 1 ч.

Обсуждение результатов

Эффективность сорбентов на основе терморасширенного графита в сравнении с активированным углем определяли на примере адсорбции уксусной кислоты.

Зависимости эффективности порошковых сорбентов по отношению к уксусной кислоте при малой их выдержке в растворах разной концентрации имеют сходный характер, однако эффективность терморасширенного графита в 1.9 – 2 раза выше по сравнению с активированным углем и составляет 60 – 72% (рис. 1). Регенерация несколько улучшает адсорбционные свойства терморасширенного графита, что особенно заметно при малом времени выдержки в растворе уксусной кислоты. Это, вероятно, связано с тем, что при термолитзе уксусной кислоты образуются газообразные продукты (водяной пар и CO_2), что приводит к повышению давления в межслойном пространстве и увеличению расстояния между слоями графита, что в свою очередь повышает доступность поверхности

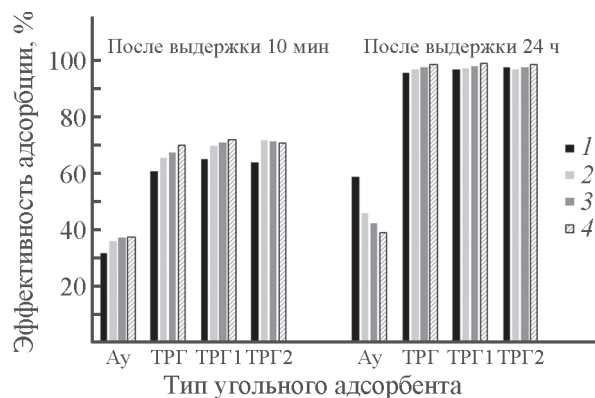


Рис. 1. Эффективность порошковых сорбентов по отношению к уксусной кислоте после выдержки в растворах уксусной кислоты с начальной концентрацией (моль·л⁻¹): 1 — 0.1 , 2 — 0.2 , 3 — 0.3 , 4 — 0.4 .

Адсорбент: Ау — активированный уголь; ТРГ — терморасширенный графит; ТРГ1, ТРГ2 — терморасширенный графит после первой и второй регенерации соответственно.

пор (при сохранении гидрофобности поверхности) и их адсорбционную способность.

При большой выдержке (24 ч) характер зависимостей, полученных для сорбентов на основе терморасширенного графита, не изменяется. Эффективность адсорбции активированным углем понижается с увеличением концентрации раствора уксусной кислоты. В соответствии с результатами эффективность активированного угля ниже по сравнению с адсорбентами на основе терморасширенного графита, который представляет собой мезопористый материал и отличается объемной полислоистой структурой [8].

Расчетные значения удельной поверхности терморасширенного графита, полученные без учета поверхности пор, в среднем составляют $180 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ и практически совпадают со значениями удельных поверхностей терморасширенного графита, рассчитанных с использованием многоточечного метода Брунауэра–Эммета–Теллера, который позволяет учесть полную поверхность материала: $30\text{--}300 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ [9, 10]. Следует отметить, что важной характеристикой адсорбционных материалов является объем пор. В зависимости от условий окисления графита объем пор образцов терморасширенного графита составляет $0.919\text{--}1.827 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ [9]. Объем пор образцов активированного угля с наиболее развитой поверхностью — $0.71\text{--}0.89 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ [11]. Таким образом, образцы терморасширенного графита имеют больший объем пор по сравнению с образцами активированного угля.

Микроструктуры терморасширенного графита и активированного угля имеют существенные различия. Частицы терморасширенного графита представляют собой пакет из слоев (чешуек) толщиной в один или несколько атомов углерода, причем расстояние между такими слоями значительно больше толщины слоев. Такое межслоевое пространство доступно по всей боковой поверхности частиц, нормальной к направлению вспенивания или к самим углеродным слоям. Соответственно достигается высокая доступность жидкостей и газов к поверхности слоев частиц. В активированном угле поры — это система цилиндрических (капиллярных) и сферических пор, доступность к поверхности которых определяется размерами сечений открытых на поверхности частицы пор. Активированный уголь является значительно более плотным пористым материалом с большой долей закрытых пор. Соответственно такая система менее доступна для адсорбируемых веществ. Терморасширенный графит из лигнина выгодно отличается от терморасширенных природных графитов мелкодисперсностью и на 65% состоит из частиц размерами менее 50 мкм. Частицы графита из лигнина

характеризуются высокой степенью вспенивания и раскрытия графитовых частиц [12].

Увеличение концентрации адсорбата сопровождается увеличением эффективности адсорбции в связи с уменьшением поверхностной энергии, что характерно при адсорбции из растворов, содержащих вещества малой концентрации. При малых выдержках эффективность адсорбентов незначительно снижается при увеличении толщины сорбционного слоя (уменьшения плотности сорбента) (рис. 2, кривые 2–4; рис. 3), что связано, по нашему предположению, с уменьшением доступности активных центров адсорбции в глубоких порах вследствие гидрофобности поверхности графита. Зависимость эффективности процесса адсорбции от толщины нанесенного сорбента выражена в незначительной степени при любом времени выдержки.

Степень набухания композиционных сорбентов при выдержке 24 ч в растворах уксусной кислоты не превышает 2.6%. Улучшение адсорбционной способности материалов по мере увеличения времени выдержки, по нашему мнению, может быть объяснено набуханием, так как в результате увеличивается пористость адсорбента и соответственно адсорбирующая поверхность.

Эффективность порошковых сорбентов на основе терморасширенного графита при больших выдержках достаточно высока (95–99%) и после регенерации не

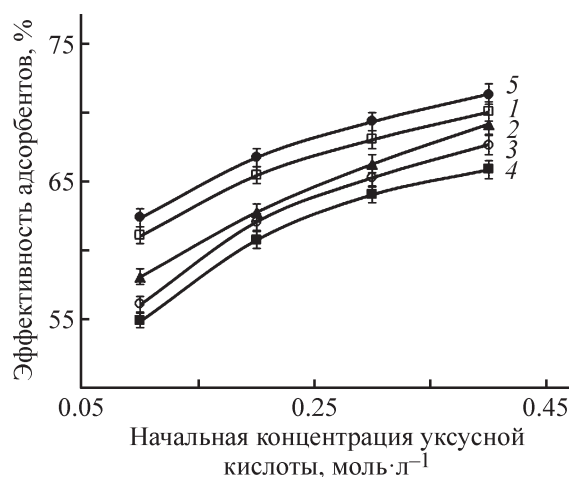


Рис. 2. Эффективность сорбентов на основе терморасширенного графита по отношению к уксусной кислоте.

1 — порошковый сорбент; композиционный сорбент (состав: 94 г бисульфата графита + 6 г Na-карбоксиметилцеллюлозы + 40 г H₂O) с исходной толщиной слоя (мм): 2 — 2.1, 3 — 3.2, 4 — 4.5; 5 — композиционный сорбент с исходной толщиной слоя 4.5 мм после однократной регенерации.

Время выдержки образцов в уксусной кислоте — 10 мин.

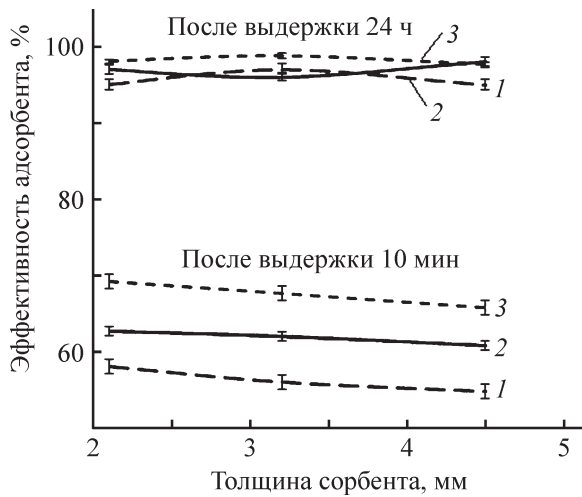


Рис. 3. Эффективность адсорбции композиционным сорбентом на основе терморасширенного графита (состав: 94 г бисульфата графита + 6 г Na-карбоксиметилцеллюлозы + 40 г H₂O) в зависимости от толщины слоя сорбента и от времени выдержки в растворе уксусной кислоты с начальной концентрацией (моль·л⁻¹): 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.4.

уменьшается (рис. 1). В случае регенерации сорбентов после поглощения масел повышение адсорбционной способности сорбентов объясняется тем, что при термоллизе масел на поверхности пор образуются гидрофильные углеродные частицы, например кокс. Это повышает смачиваемость поверхности пор и их удельную поверхность и, как следствие, адсорбционную способность.

При поглощении веществ из растворов малой концентрации уксусной кислоты количество адсорбированного вещества не зависит от плотности адсорбента и определяется его активной поверхностью. Напротив, при сорбции масел плотность адсорбирующего материала влияет на количество поглощенного вещества. Уменьшение плотности слоя адсорбента (увеличение толщины слоя) сопровождается ростом коэффициента маслопоглощения (рис. 4, 5).

Наибольшие значения коэффициента маслопоглощения достигаются при плотности сорбента 0.008–0.012 г·см⁻³ (толщина слоя адсорбента 6.5–10 мм) (рис. 5). При плотности слоя сорбента 0.05–0.1 г·см⁻³ коэффициент маслопоглощения значительно ниже. По мере снижения плотности сорбента линейная зависимость коэффициента маслопоглощения от толщины слоя композиционного сорбента нарушается, что, видимо, связано с увеличением влияния набухания на процесс маслопоглощения при плотности сорбента 0.008–0.012 г·см⁻³. Нанослоистая структура терморасширенного графита ведет себя как система

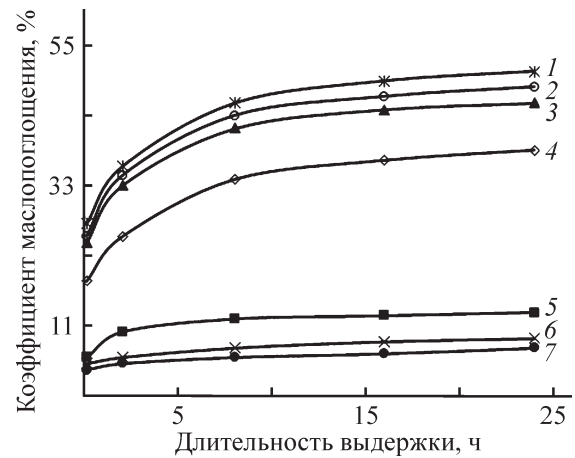


Рис. 4. Зависимость коэффициента маслопоглощения композиционного сорбента на основе терморасширенного графита (состав: 92 г бисульфата графита + 8 г Na-карбоксиметилцеллюлозы + 50 г H₂O) от длительности выдержки сорбента в масле МС-20 при плотности сорбента (г·см⁻³): 1 — 0.008, 2 — 0.01, 3 — 0.012, 4 — 0.015, 5 — 0.05, 6 — 0.08, 7 — 0.1.

с плоскими капиллярами, а так как жесткость слоев в частице терморасширенного графита мала, происходит увеличение расстояния между слоями, рост объема пор и адсорбирующей поверхности. Менее плотные сорбенты набухают быстрее. Степень набухания композиционных сорбентов в маслах при максимальном времени выдержки (24 ч) достигает 4.6–4.9%.

Рост массы адсорбированного вещества и соответственно маслопоглощения определяется измене-

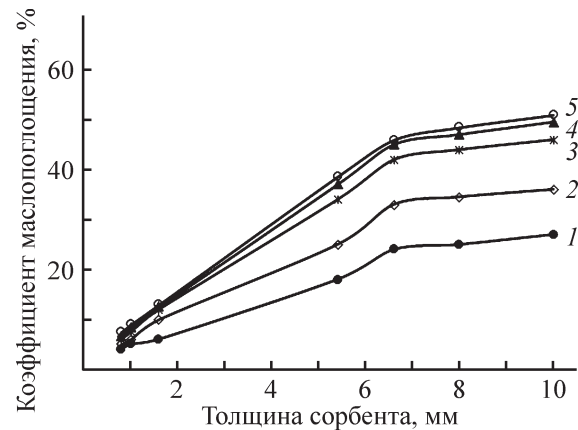


Рис. 5. Зависимость коэффициента маслопоглощения композиционного сорбента (состав: 92 г бисульфата графита + 8 г Na-карбоксиметилцеллюлозы + 50 г H₂O) на основе терморасширенного графита от толщины слоя сорбента при времени выдержки в масле МС-20 (ч): 1 — 0.1, 2 — 2, 3 — 8, 4 — 16, 5 — 24.

Значения констант уравнения зависимости коэффициента маслопоглощения композиционных сорбентов на основе терморасширенного графита

Плотность адсорбента, г·см ⁻³	Константы уравнения $K = a \ln t + b$			
	масло МС-20		вазелиновое масло	
	a	b	a	b
0.008	4.19	34.91	4.03	33.36
0.01	4.48	36.19	3.84	32.60
0.012	4.02	33.55	3.69	32.06
0.015	3.50	27.08	3.21	26.16
0.05	1.24	9.11	1.14	8.57
0.08	0.78	5.65	0.70	5.44
0.1	0.63	4.57	0.65	4.43

нием коэффициента маслопоглощения в зависимости от времени выдержки композиционного сорбента в масле (5). Рассчитанные из экспериментальных данных значения констант этого уравнения представлены в таблице.

$$K = a \ln t + b, \quad (5)$$

где a и b — постоянные, зависящие от природы масла и плотности адсорбента; t — время выдержки адсорбента в масле.

Значения констант уравнения, полученных при выдержке сорбента в вазелиновом масле, несколько ниже полученных при выдержке в масле МС-20. Уравнение позволяет рассчитать коэффициент маслопоглощения композиционного сорбента в зависимости от длительности его выдержки в масле с учетом природы масла и плотности сорбента.

Выводы

Терморасширенный графит, полученный из гидролизного лигнина, композиты на его основе перспективны как высокоэффективные адсорбенты, способные к регенерации. Адсорбционная способность терморасширенного графита и композиционных сорбентов на его основе одинаково высока при сорбции веществ из растворов кислоты малой концентрации и масел, поэтому такие адсорбенты могут широко применяться в фильтрах различной конструкции для очистки промышленных растворов и сточных вод, а также при водоподготовке.

Результаты проведенного исследования позволяют рекомендовать к применению композиционные сорбенты с плотностью 0.02–0.05 г·см⁻³ для адсорбции веществ из растворов низкой концентрации. Для адсорбции органических гидрофобных соединений

рекомендуется использовать объемные сорбенты с плотностью слоя 0.008–0.012 г·см⁻³.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Сербиновский Алексей Михайлович, к.т.н., н.с., Южный федеральный университет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0135-974X>

Сербиновский Михаил Юрьевич, д.т.н., проф., Южный федеральный университет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5405-4632>

Попова Ольга Васильевна, д.т.н., проф., Донской государственный технический университет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8130-6196>

Список литературы

- [1] Кулакова И. И., Лисичкин Г. В. Перспективы применения графеновых наноматериалов: сорбенты, мембраны, газовые сенсоры (обзор) // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 9. С. 1090–1103. <https://doi.org/10.31857/S0044461821090012>
[Kulakova I. I., Lisichkin G. V. Prospects for using graphene nanomaterials: Sorbents, membranes, and gas sensors // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. P. 1177–1188. <https://doi.org/10.1134/S1070427221090019>].
- [2] Januário E. F. D., Vidovix T. B., Beluci N. de C. L., Paixão R. M., Silva L. H. B. R. da, Homem N. C., Bergamasco R., Vieira A. M. S. Advanced graphene oxide-based membranes as a potential alternative for dyes removal: A Review // Sci. Total Environ. 2021. V. 789. ID 147957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147957>

- [3] Pavlova J. A., Ivanov A. V., Maksimova N. V., Pokholok K. V., Vasiliev A. V., Malakho A. P., Avdeev V. V. Two-stage preparation of magnetic sorbent based on exfoliated graphite with ferrite phases for sorption of oil and liquid hydrocarbons from the water surface // *J. Phys. Chem. Solids*. 2018. V. 16. P. 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.jpss.2018.01.044>
- [4] Султыгова З. Х., Темирханов Б. А., Арчакова Р. Д. Исследование свойств термически расширенного графита для реабилитации нефтезагрязненных водных экосистем // *Экология и пром-сть России*. 2021. Т. 25. № 7. С. 37–41. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-7-37-41>
- [5] Obratsova E. Yu., Barshutina M. N., Bakunin E. S., Rukhov A. V., Shipovskaya A. A., Shuklinov A. V. Adsorption characteristics of nanographite oxide obtained from thermally expanded graphite // *Mendeleev Commun.* 2020. V. 30 (2). P. 174–176. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2020.03.014>
- [6] Попова О. В., Сербиновский М. Ю. Графит из гидролизного лигнина: способ получения, структура, свойства, применение // *ЖПХ*. 2014. Т. 87. № 6. С. 808–813. <https://www.elibrary.ru/nqhyko> [Popova O. V., Serbinovskii M. Y. Graphite from hydrolysis lignin: Preparation procedure, structure, properties, and application // *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. V. 87. N 6. P. 818–823. <https://doi.org/10.1134/S1070427214060251>].
- [7] Апостолов С. П., Краснов В. В., Финаенов А. В. Электрохимический синтез гидросульфата графита в потенциостатическом режиме // *ЖПХ*. 1997. Т. 70. № 4. С. 602–607 [Apostolov S. P., Krasnov V. V., Finaenov A. I. Electrochemical synthesis of graphite hydrosulfate in potentiostatic mode // *Russ. J. Appl. Chem.* 1997. V. 70. N 4. P. 577–582].
- [8] Чесноков Н. В., Кузнецов Б. Н., Микова Н. М. Углеродные и композиционные материалы из природных графитов // *Журн. Сиб. федерал. ун-та. Химия*. 2013. Т. 6. № 1. С. 11–22. <https://www.elibrary.ru/pzerev>
- [9] Баннов А. Г., Тимофеева А. А., Шинкарев В. В., Дюкова К. Д., Ухина А. В., Максимовский Е. А., Юсин С. И. Синтез и исследование свойств оксида графита и терморасширенного графита // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2014. Т. 50. № 2. С. 166–173. <https://doi.org/10.7868/S0044185614020041> [Bannov A. G., Timofeeva A. A., Shinkarev V. V., Dyukova K. D., Ukhina A. V., Maksimovskii E. A., Yusin S. I. Synthesis and studies of properties of graphite oxide and thermally expanded graphite // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2014. V. 50. P. 183–190. <https://doi.org/10.1134/S207020511402004X>].
- [10] Krawczyk P. Effect of ozone treatment on properties of expanded graphite // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 172. N 2–3. P. 1096–1102. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.005>
- [11] Иванов И. П., Веприкова Е. В., Чесноков Н. В. Строение и сорбционные свойства активированных углей, полученных из предварительно карбонизованной коры кедрa // *Журн. Сиб. федерал. ун-та. Химия*. 2022. Т. 15 (2). С. 265–274. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0291>
- [12] Попова О. В., Сербиновский А. М., Шкуракова О. Э. Бисульфат графита и терморасширенный графит из гидролизного лигнина // *Электрохим. энергетика*. 2010. Т. 10. № 1. С. 43–47. <https://www.elibrary.ru/mliaad>