

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 544.54.05

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОПОРИСТЫХ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННЫХ ГАЗОВ

© 2024 г. О. В. Горбунова^{а,*}, Т. И. Гуляева^а, А. Б. Арбузов^а, О. Н. Бакланова, А. В. Лавренов^а

^аЦентр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт Катализа СО РАН
644040, г. Омск – 40, ул. Нефтезаводская, 54, Омск-40, 644040 Россия
*e-mail: oxana_gorbunova@inbox.ru

Поступила в редакцию 07.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Описан способ получения микропористого углеродного сорбента на основе тяжелого остатка нефтепереработки – нефтяного асфальта, который после карбонизации при 500°C смешивали с гидроксидом калия в соотношении 4/1 – 1/1 в планетарно-центробежной мельнице АГО-2 при центростремительным ускорением мелющих тел 1000 м/с², с последующей высокотемпературной активацией при 800°C в течение 60 мин. Для полученных образцов измерены изотермы адсорбции чистых газов CO₂ и CH₄ при 273, 298 К. Так, для образцов, полученных с соотношением КОН/асфальт = 1 и 2, при 273 К и 1 бар адсорбционная способность по CO₂ и CH₄ составила 5.6–5.9 и 2.2 ммоль/г соответственно. Лучшая адсорбционная емкость CO₂ при 273 К и 1 бар в исследуемой серии образцов – 6.3 ммоль/г была получена для образца КОН/асфальт = 3/1. Установлено, что механическая активация асфальта и КОН способствует формированию углеродных материалов с более развитой пористой структурой, а именно, увеличению текстурных характеристик на 30% в сравнении с образцами, приготовленными без проведения МА. Таким образом, представленный подход применения механической и химической активаций способствует получению пористого углерода, удовлетворяющего требованию адсорбционного разделения смеси газов метана и углекислого газа.

Ключевые слова: механическая активация, углеродные сорбенты, нефтяной асфальт.

DOI: 10.31857/S0044185624040013, EDN: MANAKZ

ВВЕДЕНИЕ

Разделение газовых смесей CO₂/CH₄/N₂ имеет важное значение в ряде промышленных процессов, например, очистка природного газа, добыча метана из угольных пластов и улавливание CO₂ из техногенных газов [1]. CO₂ вносит основной вклад в глобальное потепление. Известно, что стационарные электростанции сжигающие ископаемое топливо являются основным источником выбросов CO₂

[2]. CH₄ также является парниковым газом, но при этом представляет собой экологически чистый и дешевый источник энергии [3]. Газы содержащие CH₄ (биогаз и природный газ), стали одним из самых быстрорастущих источников энергии в мире [4]. Однако примеси (CO₂, N₂) значительно снижают теплотворную способность CH₄ и должны быть удалены [4]. В связи с этим крайне важно улавливать CO₂ и извлекать CH₄ из смесей CO₂/N₂, CH₄/CO₂ и CH₄/N₂.

По сравнению с традиционными адсорбционными способами, методы адсорбционного разделения привлекают большое внимание из-за их простого технологического оснащения и отсутствия коррозии оборудования [5, 6]. Ключом к реализации промышленного применения адсорбционных методов разделения является разработка высокоэффективных адсорбентов [7]. Идеальный адсорбент должен обладать низкой стоимостью, высокой адсорбционной способностью и селективностью, легкой регенерацией [6]. Пористые углеродные материалы (УМ) с высокой удельной поверхностью, большим объемом пор перспективны в качестве твердых адсорбентов для разделения $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2$ [1, 8].

Углеродные адсорбенты могут быть синтезированы из углеродсодержащих материалов путем пиролиза и активации при повышенных температурах [9]. Во многих случаях для активации углеродсодержащих предшественников используют избыточное количество щелочи. Гидроксид калия – один из наиболее эффективных активирующих агентов, который позволяет получать микропористые углеродные материалы с площадью удельной поверхности на уровне 2000–3000 $\text{m}^2/\text{г}$ по методу БЭТ [10, 11].

Известны исследования, посвященные получению УМ из недорогого углеродсодержащего предшественника – нефтяного асфальта [12, 13]. Асфальт является побочным продуктом нефтепереработки, его получают из густого тяжелого остатка, который остается после выделения горюче-смазочных материалов. Сегодня, асфальт имеет невысокую стоимость, производится в большом количестве и не находит квалифицированного применения [14]. Асфальт является недооцененным сырьем для приготовления пористых углеродных материалов, при этом содержание углерода в асфальте более 85%. Кроме того входящие в состав асфальта асфальтены образуют наноразмерные сопряженные ароматические структуры, формирующие пористые асфальтеновые агрегаты [15, 16]. В наших ранних работах [17, 18] мы продемонстрировали успешный синтез пористых углеродных материалов из нефтяного асфальта. Полученные материалы обладали развитыми текстурными характеристиками, сравнимыми с гораздо более дорогими углеродными материалами. Синтезированные образцы показали высокую адсорбционную емкость CO_2 3.8–3.1 ммоль/г при 25°C и давлении 1 бар, что соответствует, но не превышает современный уровень адсорбционной емкости для

других известных углей, активированных различными способами [6]. Несмотря на эффективность химической активации развить текстуру углеродсодержащих предшественников, асфальта в том числе, существует ряд условий, которые следует учитывать. Так необходимость избыточного потребления щелочи, сложность равномерного смешения с углеродным предшественником, проведение стадии отмычки от активирующего агента ограничивают масштаб применения данного способа активации. В последнее время предпринято много усилий для поиска быстрых, экологичных, эффективных и простых технологий получения пористых материалов. В этой области набирает популярность механическая активация (МА), поскольку она позволяет экологически безопасно производить большое разнообразие наноматериалов и становится чрезвычайно мощным и универсальным методом синтеза [19].

Известно, что МА используется для эффективного смешивания предшественника углерода с химическим активатором [20–22], но работ, посвященных исследованию влияния этой стадии на формирование пористой структуры углеродных материалов, обнаружено не было. Соответственно, целью работы стало установление закономерностей между проведением механической и химической активации и формированием пористой структуры углеродных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

В качестве сырья использовали нефтяной асфальт производства ООО “Газпромнефть – Смазочные материалы”, г. Омск. Плотность 1.05 $\text{г}/\text{см}^3$ (ГОСТ 3900–85). Элементный анализ: углерод – 86.9% водород – 9.1% , сера – 2.4% , азот – 0.7% , кислород – 0,84% . Содержание асфальтенов 11.5% ASTM D6560.

Синтез углеродных материалов из нефтяного асфальта

Сырой асфальт нагревали в капсуле, установленной в печь в течение 60 мин в потоке Ar для удаления летучих компонентов. Температура обработки 500°C была выбрана из результатов термического анализа [17]. КОН смешивали с термообработанным асфальтом в соотношении 4:1, 3:1, 2:1, 1:1 в планетарной мельнице АГО-2

производства ЗАО НОВИЦ (г. Новосибирск, Россия) с ускорением мелющих тел 1000 м/с². В качестве мелющих тел использовали стальные шары диаметром 8 мм. Соотношение масс смеси (асфальт и КОН) и мелющих тел – 1:20. Время механической активации 5 мин. Полученные промежуточные смеси асфальт + КОН (в соотношении 4:1, 3:1, 2:1, 1:1) были разделены на две части. Часть образцов сразу после МА обрабатывали 1н НСl, промывали дистиллированной водой и сушили при 110°С до постоянной массы. Далее эти образцы были исследованы для установления влияния МА на процесс дальнейшей активации. Другую часть смеси асфальта и КОН после МА помещали в капсулу, которую устанавливали в печь и нагревали со скоростью 5°С/мин, конечная температура 800°С. Полученные продукты обрабатывали 1н НСl и промывали дистиллированной водой. Образец сушили при 110°С до постоянной массы.

Физико-химические методы исследования

Текстурные характеристики полученных углеродных материалов определяли из анализа изотерм адсорбции и десорбции азота на приборе Micromeritics ASAP 2020, США. Удельная площадь поверхности была получена по уравнению БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера), а общий объем пор ($V_{адс.}$) определен при относительном давлении (P/P_0) 0.99. Объем микропор ($V_{микро}$) оценивали, применяя α_s -метод. Распределение пор по размерам получали с использованием методов теории нелокального функционала плотности для гетерогенной поверхности (2Д-НЛДФТ) для адсорбционной ветви изотерм, модель реализована в программном обеспечении SAIEUS (Micromeritics).

Изотермы адсорбции CO₂, CH₄ и N₂ были измерены в диапазоне давлений 0.03–1 бар при температурах 0°С и 25°С с использованием сорбционного анализатора Sorptomatic 1900 (Carlo Erba Instruments, Италия). Перед измерениями образцы дегазировали при 300°С в течение 3 ч. Селективность адсорбции газов CO₂/N₂, CH₄/N₂, CO₂/CH₄ рассчитывали с применением теории идеального адсорбированного раствора (IAST) [23].

Состав поверхностных функциональных групп углеродных образцов после механической активации был исследован на ИК Фурье-спектрометре IRPrestige-21 (Shimadzu, Япония).

В табл. 1 приведены принятые в статье обозначения образцов.

Таблица 1. Обозначение образцов

Образец	Карбонизация (500°С)	МА	КОН/асфальт	Активация (800°С)
A-500	+	–	–	–
МА-A-500	+	+	–	–
МА-A-500-1	+	+	1	–
МА-A-500-2	+	+	2	–
МА-A-500-3	+	+	3	–
МА-A-500-4	+	+	4	–
МА-A-800-1	+	+	1	+
МА-A-800-2	+	+	2	+
МА-A-800-3	+	+	3	+
МА-A-800-4	+	+	4	+

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты низкотемпературной адсорбции азота

Пористость активированных углей из нефтяного асфальта исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота. Изотермы адсорбции и десорбции азота на активированных углях серии МА-A-800-х представлены на рис. 1а. Вид изотерм для всех образцов из этой серии характерен для микропористых материалов с петлей гистерезиса типа H4 [24]. По мере увеличения количества КОН происходит формирование углеродного материала с более развитой пористой структурой, способной адсорбировать большее количество азота, что является ожидаемой тенденцией. Протяженный подъем в области P/P_0 0.1–0.2 для образцов МА-A-800–3,4 может быть связан с дополнительным формированием мелких мезопор [25, 26].

Кривые распределения пор по размерам, рассчитанные методом 2Д-НЛДФТ из адсорбционной ветви (рис. 1б), соответствующие образцам МА-A-800–1 и МА-A-800–2, имеют узкое распределение с выраженным максимумом в области ультрамикропор 0.6 нм. При увеличении количества щелочи происходит перераспределение объемов и формирование дополнительного количества супермикропор и мелких мезопор. Так, образец МА-A-800–4 уже имеет широкое распре-

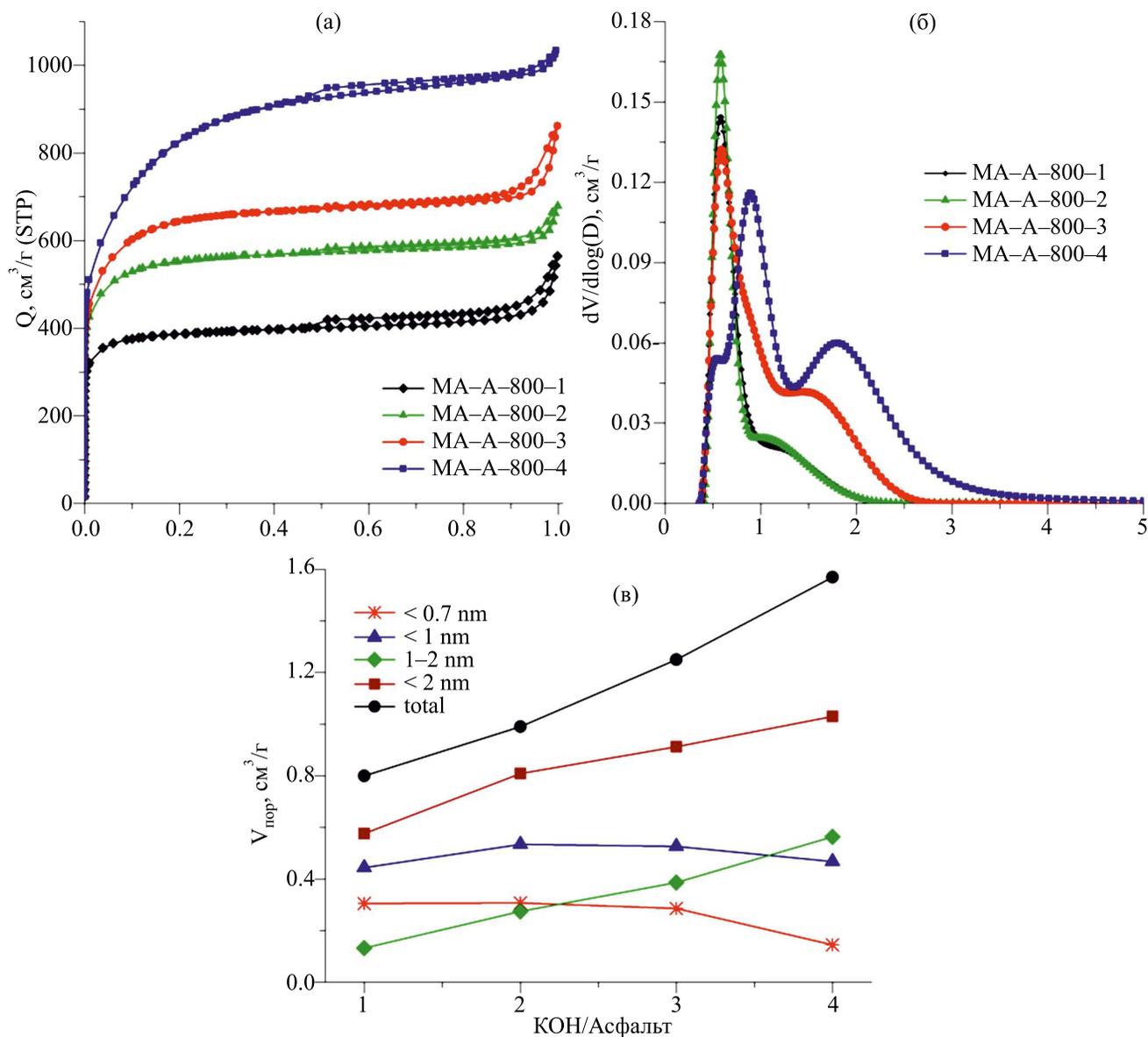


Рис. 1. (а) Изотермы адсорбции-десорбции N_2 при 77 К, (б) 2Д-НЛДФТ распределение пор по размерам углеродных материалов, полученных из асфальта, (в) объемы пор с различным размером пор из расчета методом 2Д-НЛДФТ.

деление пор по размерам в области до 5 нм с выраженными максимумами 1 и 2 нм. Из рис. 1в видно, что при соотношении КОН/асфальт более 2 происходит снижение доли ультрамикропор размером менее 0.7 нм в результате их схлопывания и формирования более крупных супер- и мезопор (рис. 1в). Эти результаты указывают на то, что более низкое соотношение КОН/асфальт способствует образованию пор меньшего размера.

Текстурные характеристики синтезированных образцов приведены в табл. 2. Для сравнения в таблице представлены опубликованные ранее основные показатели пористой структуры

образцов, полученных без дополнительной стадии механической активации [17]. Изменение соотношения КОН:асфальт от 1 до 4 приводит к постепенному увеличению удельной площади поверхности и объема пор до 50%. Проведение МА асфальта с КОН увеличивает показатели пористой структуры на 30% в сравнении с образцами, приготовленными ранее [17]. Дополнительное стимулирование развития пористости происходит не только за счет тонкого измельчения и однородного смешения реагентов. Можно предположить, что формирование пористой текстуры начинается на стадии механической активации в планетар-

Таблица 2. Показатели пористой структуры активированных углеродных образцов, полученных из асфальта

Образец	$S_{БЭТ}, \text{м}^2/\text{г}$	$V_{алс}, \text{см}^3/\text{г}$	$V_{микро}, \text{см}^3/\text{г}$
МА-А-800-1	1497	0.80	0.55
МА-А-800-2	2088	0.99	0.80
МА-А-800-3	2407	1.25	0.92
МА-А-800-4	2935	1.57	1.00
1/2 [17]	1444	0.67	0.56
1/3 [17]	1610	0.76	0.62
1/4 [17]	1971	0.97	0.77

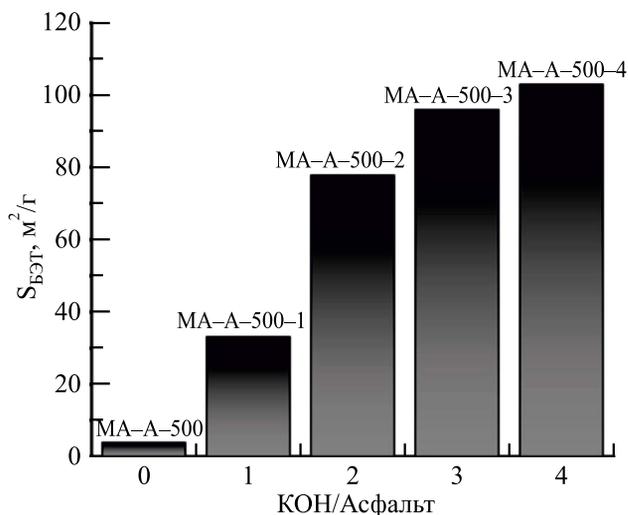


Рис. 2. Зависимость удельной площади поверхности по БЭТ образцов после МА в зависимости от соотношения КОН/асфальт.

ной мельнице. При этом увеличивается число точечных контактов, осуществляется их постоянное обновление, реализуются процессы размножения и миграции дефектов в объеме твердого тела, причем подвижность частиц смеси может быть достаточной для перемешивания вещества на молекулярном уровне. Это может способствовать более эффективному развитию пористой структуры углеродных материалов при последующей высокотемпературной активации. В связи с этим предположением, была исследована пористая структура образцов, полученных сразу после МА асфальта с КОН. Также для сравнения была проанализирована текстура асфальта после МА без добавления КОН. Видно, что при совместной механической активации асфальта и КОН с ростом содержания КОН текстурные характеристики $S_{БЭТ}$ и $V_{алс}$ увеличиваются в несколько раз по сравнению с карбонизованным асфальтом после МА без КОН (МА-А-500). На рис. 2. показана зависимость $S_{БЭТ}$ образцов после механической активации от соотношения КОН/асфальт. Полученные результаты свидетельствуют о формировании первичной пористости после совместной МА асфальта и КОН.

Исследование поверхностных функциональных групп

Методом ИК-спектроскопии был проанализирован состав поверхностных функциональных групп углеродных образцов карбонизованного

асфальта до и после механической активации, а также образца после совместной активации асфальта (табл. 3) и КОН (МА-А-500-1). На рис. 3 приведены ИК спектры исследуемых углеродных образцов. Спектры подобны. В ИК-спектрах образцов присутствует полоса поглощения (п.п.) при 1576 см^{-1} характерная для валентных колебаний связей $\text{C}=\text{C}$ ароматических колец. Регистрируемая п.п. при 3035 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связей $\text{C}-\text{H}$ ароматических колец. Полосы поглощения (п.п.) при $745; 803$ и 865 см^{-1} , относятся к внеплоскостным деформационным колебаниям связей $\text{C}-\text{H}$ ароматических колец. В ИК спектрах также наблюдали п.п. в спектральных областях $2800-2950$ и $1350-1450 \text{ см}^{-1}$, которые относятся соответственно к валентным и деформационным колебаниям связей $\text{C}-\text{H}$ в $-\text{CH}_2-$ и $-\text{CH}_3-$ группах. Проявляемые п.п. в спектральной области

Таблица 3. Показатели пористой текстуры карбонизованного асфальта после МА

Образец	$S_{БЭТ}, \text{м}^2/\text{г}$	$V_{алс}, \text{см}^3/\text{г}$	$V_{микро}, \text{см}^3/\text{г}$
МА-А-500	3.9	0.011	0.001
МА-А-500-1	33.2	0.118	0.004
МА-А-500-2	77.8	0.351	0.008
МА-А-500-3	96	0,312	0,011
МА-А-500-4	103.6	0.369	0.013

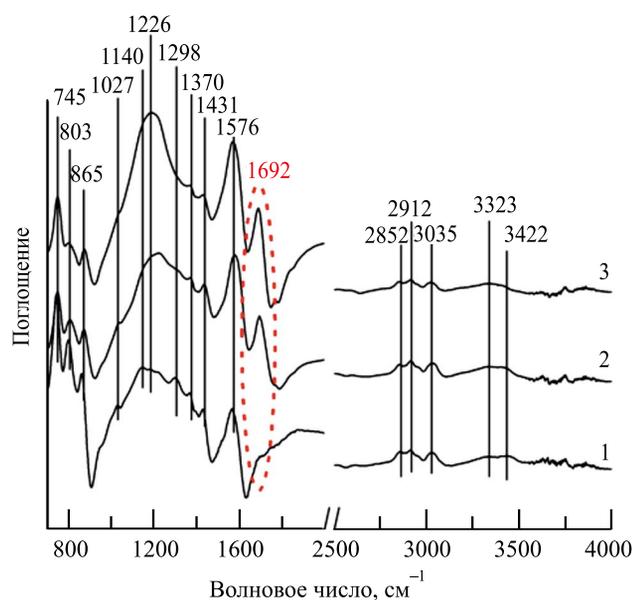


Рис. 3. ИК-спектры образцов: (1) карбонизованный асфальт при 500°C; (2) карбонизованный асфальт после МА; (3) карбонизованный асфальт после механической активации с КОН.

1200–1300 см^{-1} отвечают валентным колебаниям связей С–С–О в эфирах фенолах и лактонах, характерных для углеродных материалов [27]. Кроме того, в спектральной области 3200–3500 см^{-1} ИК спектров исследуемых образцов были обнаружены широкие мало интенсивные п.п. при 3323 и 3422 см^{-1} , которые характерны для валентных колебаний связей О–Н в спиртах, фенолах и карбоновых кислотах, связанных водородной связью. Регистрируемая п.п. в спектральной области 1000–1200 см^{-1} соответствует валентных колебаний связей С–О. Кроме того, в ИК-спектрах наблюдали п.п. при 1692 см^{-1} , относящуюся к валентным колебаниям связей С=О в карбоновых кислотах, кетонах и сложных эфирах. В результате МА асфальта с КОН, а также МА только асфальта происходит существенное увеличение интенсивности данной п.п. при 1692 см^{-1} (рис. 1, спектры 2, 3). Известно, что поверхностные группы играют важную роль в химической активации, т.к. они реагируют с КОН в процессе активации с образованием промежуточных частиц С–О–К, действующих как активные центры. Далее полученные частицы реагируют с углеродом предшественника [28, 29]. Таким образом, механическая активация нефтяного асфальта приводит к окислению поверхности асфальта и появлению дополнитель-

ных активных центров, а, следовательно, способствует более эффективному окислению при дальнейшей активации КОН.

Изотермы адсорбции чистых газов CO_2 , CH_4 , N_2

Были измерены изотермы адсорбции чистых газов CO_2 , CH_4 и N_2 при 273, 298 К, результаты представлены на рис. 4 и в табл. 4. Видно, что поглощение CO_2 и CH_4 увеличивается по мере повышения давления без выхода изотерм на плато, что указывает на возможность адсорбции большего количества CO_2 и CH_4 при более высоком давлении.

Адсорбционная емкость CO_2 , CH_4 и N_2 при 1.0 бар каждого активированного образца уменьшается в ряду: $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$. Максимальное поглощение CO_2 составило 6.3 ммоль/г и 4.1 ммоль/г при 273 К и 298 К, соответственно, у образца МА-А-800–3. Полученный результат соответствует современному уровню адсорбционной емкости большинства известных на сегодняшний день адсорбентов CO_2 . Например, для пористого углеродного материала полученного из стеблей гигантского тростника емкость по CO_2 составляет (6.3 ммоль/г при 273 К) [30], для пористого углерода, из скорлупы водяного каштана легированного азотом – 4.50 ммоль/г (298 К) и 6.04 ммоль/г (273 К) [31], для углеродных адсорбентов из нефтяного кокса – 4.18 и 5.57 ммоль/г при 298 и 273 К, соответственно [32], для легированного азотом углерода на основе хитозана – 6.33 ммоль/г при 273 К [33], для пористого углерода из остатков солодки легированный азотом – 6.43 ммоль/г при 273 К и 1 бар, 3.89 ммоль/г при 298 К [34]. Кроме того, синтезированные активированные угли из нефтяного асфальта продемонстрировали отличные характеристики адсорбции CH_4 с максимальным поглощением 2.2 ммоль/г при 273 К и 1.0 бар, сопоставимые с известными результатами на активированном угле из стеблей пальмы (2.27 ммоль/г) [1], на металлоорганических каркасных структурах SiCTF-1-650 (2.20 ммоль/г) [35], M1273-150 (2.19 ммоль/г) [36] при 1.0 бар до 273 К.

Для исследования силы взаимодействия между молекулами CO_2 и активированными образцами, были рассчитаны изостерические теплоты адсорбции по уравнению Клапейрона-Клазиуса (рис. 5). Обнаружено, что для образцов МА-А-800–3 и МА-А-800–4 Q_{st} уменьшается с увеличением поглощения газа, а затем выходит

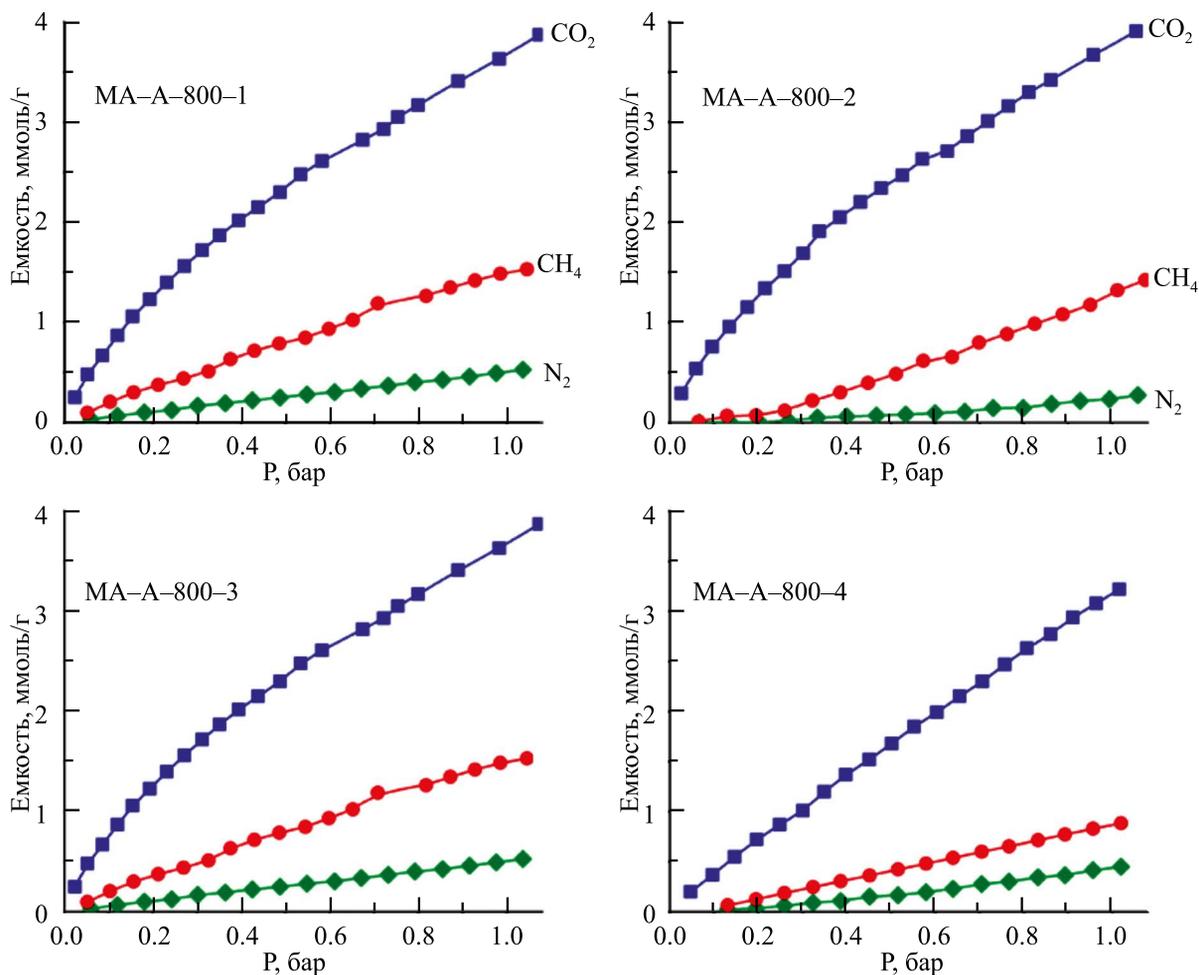


Рис. 4. Изотермы адсорбции CO₂, CH₄ и N₂ при 298 К.

на плато, рис. 5. Снижение теплоты адсорбции связана с широким распределением пор по размерам 0.5–2.5 нм указанных образцов (рис. 16). Q_{st} образца MA-A-800-1 процессе адсорбции CO₂ существенно не изменяется с увеличением адсорбированного газа.

Разделение CO₂/CH₄/N₂ очень важно с точки зрения защиты окружающей среды и использования энергии. Как видно из результатов (рис. 5, табл. 4), образцы показали высокую емкость по CO₂ и CH₄, а также низкое поглощение N₂ в условиях окружающей среды. Кроме того, теорией идеальных адсорбированных растворов (IAST) предсказана высокая селективность полученных углеродных образцов по отношению к бинарным смесям: CO₂/N₂ в соотношении 15/85 (дымовой газ), CO₂/CH₄ = 10/90 (природный газ) и CH₄/N₂ = 50/50 (газ угольных пластов) (табл. 4). Наилучшие селективности по IAST при 298 К и 1 бар 73 и 4.3 получены на MA-A-800-1

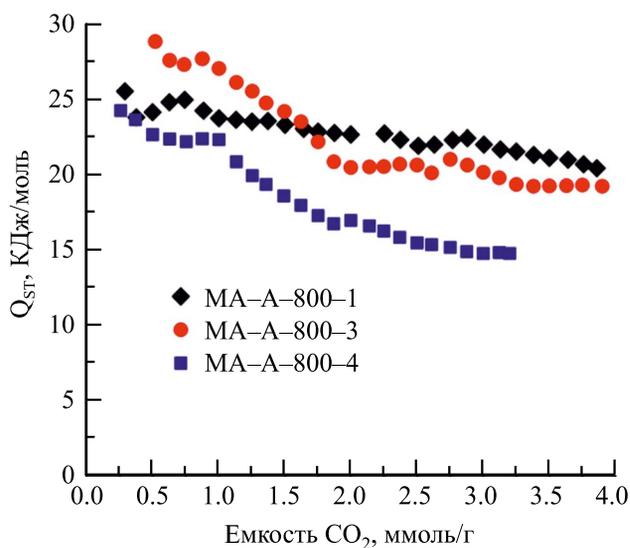


Рис. 5. Изостерические теплоты адсорбции CO₂ на активированных углеродных образцах.

Таблица 4. Адсорбционные характеристики углеродных образцов, полученных из асфальта

Образец	CO ₂ , ммоль/г		CH ₄ , ммоль/г		N ₂ , ммоль/г 25°C	Селективность IAST (при 25°C и 1 бар)		
	0°C	25°C	0°C	25°C		CO ₂ /N ₂ (15/85)	CH ₄ /N ₂ (50/50)	CO ₂ /CH ₄ (10/90)
МА-А-800-1	5.6	3.7	2.2	1.5	0.49	42	3.1	22
МА-А-800-2	5.9	3.9	2.2	1.1	0.30	73	4.3	27
МА-А-800-3	6.3	4.1	1.9	1.2	0.50	44	2.2	31
МА-А-800-4	4.9	3.2	2.0	0.9	0.45	40	2.0	32

для смесей CO₂/N₂ и CH₄/N₂ соответственно, и наибольшая селективность IAST равная 32 получена на МА-А-800–4 для CO₂/CH₄.

Таким образом, в этой работе представлен простой способ получения пористого углеродного материала удовлетворяющего требованиям адсорбционного разделения дымовых и энергетических газов. Кроме того, мы показали, что благодаря механической активации можно снижать необходимое для эффективного окисления количество КОН и при этом получать пористые углеродные материалы с высокими значениями текстурных и адсорбционных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние механической активации на формирование пористой структуры углеродных материалов. Показано, что стадия МА асфальта с КОН приводит к формированию углеродных образцов с более развитой пористой структурой. Обнаружено, что в результате МА в барабанах за счет локального повышения температуры в местах контакта трущихся тел происходит измельчение и однородное смешивание реагентов, а также развитие первичной пористости. Показано, что с ростом соотношения КОН/асфальт с 1 до 4 текстурные характеристики $S_{БЭТ}$ и $V_{адс}$ закономерно увеличиваются, однако, благодаря механической активации можно снижать необходимое для эффективной активации углеродного предшественника количество КОН до 1–2 и получать микропористые углеродные материалы с высокими значениями текстурных и адсорбционных характеристик. Кроме того, установлено, что с уменьшением соотношения КОН/асфальт с 4 до 1–2 происходит снижение среднего размера пор и формирование преимущественно ультрамикропористых образцов, для которых при 273 К и 1 бар адсорбционная способность по CO₂

и CH₄ составила 5.6–5.9 и 2.2 ммоль/г соответственно. Лучшая адсорбционная емкость CO₂ при 273 К и 1 бар в исследуемой серии образцов – 6.3 ммоль/г была получена для образца КОН/асфальт = 3. Приведенные выше результаты демонстрируют высокую адсорбционную способность пористых углей из нефтяного асфальта. Исходя из вышеизложенного, полученные результаты имеют прямое отношение к проблеме загрязнения окружающей среды и открывают новое направление исследований в поисках новых материалов для хранения энергии на основе углерода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность Г.Г. Савельевой из Центра новых химических технологий ИК СО РАН за ценный вклад в исследование.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024–0039). Физико-химические методы исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Национальный центр исследования катализаторов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu F., Zhang Y., Zhang P. et al. // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 399. P. 125812.
2. Choi S., Drese J.H., Jones C.W. // Chem. Sus. Chem. 2009. V. 2. P. 796.
3. Mudoi M.P., Sharma P., Khichi A.S. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V. 217. P. 10897.

4. *Li Y., Wang S., Wang B. et al.* // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. P. 174.
5. *Ooi Z.L., Tan P.Y., Tan L.S. et al.* // *Chin. J. Chem. Eng.* 2020. V. 28. P. 1357.
6. *Abd A.A., Naji S.Z., Barifcani A.* // *J. Environ. Chem Eng.* 2020. V. 8. P. 104142.
7. *Qin S.* // *Fuel Chem. Technol.* 2021. V. 49(10). P. 1531.
8. *Liu F., Zhang, Zhang P., et al.* // *Chemical Engineering Journal*. 2020. V. 399. P. 25812
9. *Marsh H., Reinoso F.R.* *Activated Carbon / 1st Ed., Elsevier, 2006.*
10. *Blankenship T. S., Mokaya R.* // *Energy Environ. Sci.* 2017. V. 10. P. 2552
11. *Kiełbasa K., Bayar S., Varol E.A. et al.* // *Molecules*. 2022. V. 27(21). P. 7467
12. *Javed H., Luong D.X., Lee C.-G. et al.* // *Carbon*. 2018. V. 140. P. 441.
13. *Liang W., Zhang Y., Wang X. et al.* // *Chem. Eng. Sci.* 2017. V. 162. P. 192.
14. *Liu J., Liu Y., Li P. et al.* // *Carbon*. 2018. V. 126. P. 1.
15. *Strausz O.P., Peng P., Murgich J.* // *Energy Fuels*. 2002. V. 16. P. 809.
16. *Groenzin H., Mullins O.C., Eser S. et al.* // *Energy Fuels*. 2003. V. 17. P. 498.
17. *Gorbunova O.V., Baklanova O.N., Gulyaeva T. I. et al.* // *Journal of Materials Science*. 2022. V. 57. P. 7239.
18. *Gorbunova O.V., Baklanova O.N., Gulyaeva T.I. et al.* // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V.2784. P. 020008.
19. *Szczeńśniak B., Borysiuk S., Choma J. et al.* // *Mater. Horiz.* 2020. V.7. P. 1457.
20. *Schneidermann C., Jäckel N., Oswald S.* // *Chem. Sus. Chem.* 2017. V. 10. V. 2416.
21. *Rajendiran R., Nallal M., Park K.H. et al.* // *Electrochimica Acta*. 2019. V. 317. P. 1.
22. *Rambau K.M., Musyoka N.M., Manyala N. et al.* // *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. P. 10505.
23. *Ismail M., Bustam M.A., Kari N.E.F. et al.* // *Molecules*. 2023. V. 28. P. 3016.
24. *Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V. et al.* // *Pure Appl Chem*. 2016. V. 87. P.1051.
25. *Bernasconi S., Bokhoven J.A., Krumeich F. et al.* // *Microporous and Mesoporous Mater.* 2003. V. 66. P. 21.
26. *Gorbunova O.V., Baklanova O.N., Gulyaeva T.I.* // *Microporous and Mesoporous Mater.* 2020. V. 307. P.110468.
27. *Burg P., Cagniant, D.* // *Chemistry and Physics of Carbon*. 2008. V.30. P.129.
28. *Ehrburger P., Addoun A., Addoun F. et al.* // *Fuel*. 1986. V. 65.№ 10. P. 1447.
29. *L. Chunlan et al.* // *Carbon* 43. 2005. P. 2295–2301.
30. *Singh G., Kim I.Y., Lakhi K.S. et al.* // *Carbon*. 2017. V.116. P. 448.
31. *Rao L., Liu S., Wang L. et al.* // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 359. P. 428.
32. *Bai J., Huang J., Yu Q. et al.* // *Fuel Processing Technology*. 2023. V. 244. P. 107700.
33. *Yang C., Zhao T., Pan H. et al.* // *Chemical Engineering Journal*. 2022. V. 432. P. 134347.
34. *Zhou Y., Tan P., He Z.* // *Fuel*. 2022. V. 311. P. 122507.
35. *Wang J., Yang J., Krishna R., et al.* // *J. Mater. Chem.* 2016. V. A 4. P.19095.
36. *Li Y., Li D., Rao Y., et al.* // *Carbon*. 2016. V. 145. P. 54.