

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПАРОВ БЕНЗОЛА
АКТИВИРОВАННЫМИ УГЛЯМИ МАРОК AP-A, AP-B
И УГЛЯМИ КОМПАНИИ *Baojun Activated Carbon***

Е.М. Касаткин¹

kasatkin.1991@list.ru

Л.С. Ахмедова¹

luisaakhmedova@gmail.com

Е.Б. Маркова¹

ebmarkova@gmail.com

В.С. Болдырев^{2,3}

boldyrev.v.s@bmstu.ru

Ю.М. Аверина³

averinajm@mail.ru

А.Г. Чередниченко¹

cherednichenko-ag@rudn.ru

¹ РУДН, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

³ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследования адсорбционной способности отечественного активированного угля марок AP-A и AP-B, а также угля компании *Baojun Activated Carbon* (КНР) по отношению к парам бензола. Все использованные адсорбенты предназначены для очистки воздуха от паров летучих органических соединений, но отличаются технологией получения и физико-химическими характеристиками. Установлено, что эффективность активированного угля компании *Baojun Activated Carbon* при адсорбции паров бензола выше, чем у отечественных образцов марок AP-A и AP-B. При этом среди угля зарубежного производства наиболее эффективным оказался образец марки *Baojun 4.0/90*, который имеет высокую адсорбционную способность, заявленную по отношению к парам тетраоксида углерода. Экспериментально показано, что во всех случаях кинетика процесса адсорбции хорошо описывается уравнением псевдотортого порядка Хо и Маккея. Аналогичные результаты получены при использовании модели Морриса — Вебера, которая учитывает роль диффузионных процессов в процессе адсорбции паров бензола активированными углями. Применение

Ключевые слова

Адсорбция газов, активированный уголь, легколетучие органические соединения, очистка газовых выбросов, охрана окружающей среды

уравнения Лагергрена и упрощенной модели Ело- Поступила 20.05.2021

вича для обработки экспериментальных данных Принята 11.06.2021

показали менее значимые результаты

© Автор(ы), 2022

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН

Введение. Один из наиболее распространенных источников загрязнения окружающей среды — летучие органические соединения (ЛОС), которые в больших количествах ежегодно поступают в атмосферу вместе с газообразными выбросами различных промышленных предприятий, в том числе химических и нефтехимических [1]. Среди имеющихся разновидностей ЛОС особенно часто отслеживаются выбросы ароматических соединений, поскольку они широко используются в технологических процессах большинства производств. Наиболее известным ЛОС является бензол и его производные, которые представляют собой существенную опасность для здоровья людей и окружающей среды [1, 2]. Так, острое отравление парами бензола может вызывать головную боль, сонливость и потерю сознания, а хроническое отравление провоцирует возникновение онкологических заболеваний, анемию и повреждение иммунной системы [3, 4]. Поэтому на промышленных предприятиях, использующих бензол или его производные, предпринимаются меры для предотвращения или сокращения их выбросов в зону рабочих помещений и атмосферу вместе с потоком отходящих газов. Одним из эффективных способов удаления ЛОС или снижения его концентрации до необходимого минимума является применение современных сорбентов. Традиционно для этих целей используется активированный уголь, например марок AP-A, AP-B и AP-B, изготавливаемый из каменноугольного кокса [3]. Уголь обладает развитой площадью поверхности и необходимым размером пор для эффективной сорбции различных органических растворителей из газовых сред с возможностью дальнейшей регенерации сорбента и рецикла поглощенного компонента в технологический процесс [3]. Эффективность применения активированного угля марок AP-A, AP-B и AP-B в таких технологиях достигает 99 %. Этому способствует гидрофобная неполярная поверхность активированного угля, которая влияет на закономерности процесса адсорбции ароматических углеводородов. Существующая технология изготовления активированного угля предусматривает возможность вариации его пористой структуры, размера гранул и химического состава за счет специальной обработки, что сильно влияет на его технические характеристики. Поэтому различные марки активированного угля способны адсорбировать пары

бензола и его производных с различной эффективностью. Наибольший интерес представляет уголь марок AP-A и AP-B [5]. Согласно паспортным данным, активированный уголь марки AP-B предназначен для адсорбции органических растворителей с температурой кипения не более 60 °С и имеет по сравнению с углем марок AP-A и AP-B более низкую поглощающую способность по отношению к ароматическим углеводородам. Кроме отечественных адсорбентов, в процессах газоочистки на российских предприятиях часто используют активированный уголь зарубежных производителей, в том числе из КНР. Следует отметить, что именно производители углеродных сорбентов из КНР обеспечивают в настоящее время в значительной степени удовлетворение мирового потребительского спроса в этих материалах [3].

Цель работы — определение и сравнительный анализ сорбционных характеристик отечественного активированного угля марок AP-A и AP-B и угля компании *Baojun Activated Carbon* (КНР) при очистке газовых сред от паров бензола, установление механизма и моделирование процесса адсорбции.

Экспериментальная часть. В эксперименте использовали активированный уголь марок AP-A, AP-B (ГОСТ 8703–74) и *Baojun 3.0/80*, *Baojun 3.0/85* и *Baojun 4.0/90* компании *Baojun Activated Carbon*, которые отличаются размером гранул (первое число в названии — диаметр в мм) и эффективностью адсорбции тетрахлорида углерода (второе число в названии — процент поглощенного адсорбата).

Кинетика адсорбции паров бензола исследована в режиме статической адсорбции при температуре $25 \pm 0,5$ °С. На аналитических весах взвешивали около 1,0 г исследуемого активированного угля и помещали в герметичный эксикатор, содержащий 100 мл бензола. Изучение кинетики адсорбции паров бензола проводили гравиметрическим методом через определенные интервалы времени. Количество адсорбированного бензола в расчете на 1,0 г сорбента (сорбционная емкость) рассчитывали по формуле:

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0},$$

где m_0 , m_t — масса активированного угля в начале эксперимента и в текущий момент времени при адсорбции паров бензола.

Удельная поверхность образцов активированного угля, измеренная методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе *Micromeritics ASAP-2020*, м²/г:

AP-A	AP-B	<i>Baojun</i> 3.0/80	<i>Baojun</i> 3.0/85	<i>Baojun</i> 4.0/90
902	898	980	994	1120

Результаты и их обсуждение. В ходе проведенных исследований изучены закономерности процесса адсорбции паров бензола активированным углем марок AP-A и AP-B и *Baojun* 3.0/80, *Baojun* 3.0/85, *Baojun* 4.0/90. Динамика процесса адсорбции паров бензола приведена на рис. 1. Уголь марки *Baojun* 4.0/90 показал наибольшую эффективность при поглощении паров бензола. Образец угля марки AP-A по техническим характеристикам немного уступил образцу марки AP-B и аналогам марок *Baojun*. При этом эффективность угля марок *Baojun* 3.0/80 и *Baojun* 3.0/85 практически одинакова и полученные значения занимают промежуточное между значениями для угля марок AP-A и *Baojun* 4.0/90. При анализе полученных зависимостей (см. рис. 1) можно выделить два участка. На первом участке, соответствующем 100...120 мин протекания процесса, происходит быстрое поглощение бензола, что обусловлено наличием большого числа свободных центров адсорбции. На втором участке имеет место постепенный процесс, который длится до состояния адсорбционного равновесия (≈ 360 мин) и обусловлен уменьшением числа вакантных центров адсорбции на поверхности активированного угля [6–14]. Полученные результаты представлены ниже.

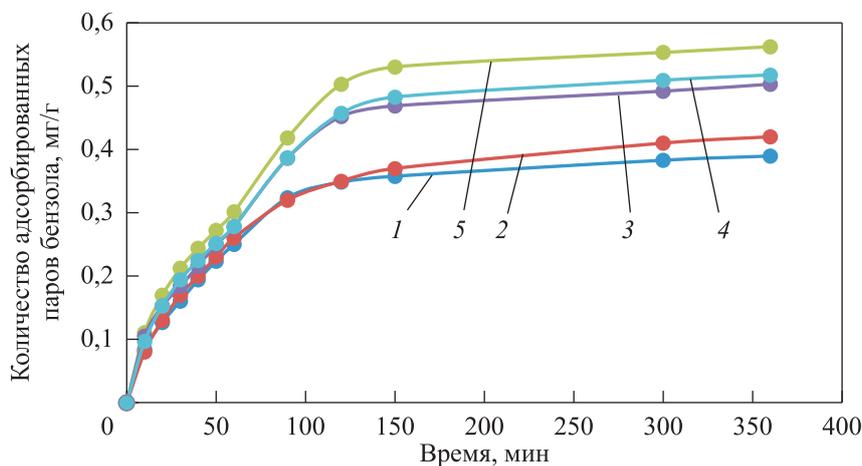


Рис. 1. Зависимость количества адсорбированных паров бензола от времени контакта для исследуемого активированного угля марок AP-A (1), AP-B (2), *Baojun* 3.0/80 (3), *Baojun* 3.0/85 (4), *Baojun* 4.0/90 (5) при температуре 25 °С

**Максимальное количество адсорбированных паров
бензола/тетрахлорида углерода, г/г**

AP-A	AP-B	<i>Baojun</i> 3.0/80	<i>Baojun</i> 3.0/85	<i>Baojun</i> 4.0/90
0,39	0,42	0,50/0,80	0,52/0,85	0,56/0,90

Результаты анализа показали, что эффективность сорбции паров бензола углем марок *Baojun* существенно меньше, чем их тестовые значения по адсорбции тетрахлорида углерода. Эти отличия можно объяснить различием химического строения, молекулярных весов и геометрических размеров молекул бензола и тетрахлорида углерода. Атомы углерода в бензоле находятся в состоянии sp^2 -гибридизации и обеспечивают плоское циклическое строение молекулы бензола, которая при адсорбции на поверхности угля может блокировать площадь, значение которой превышает аналогичное значение для тетрахлорида углерода, находящегося в состоянии sp^3 -гибридизации. Однако наличие четырех атомов хлора в молекуле тетрахлорида углерода приводит к выравниванию значений экранирования поверхности адсорбента. Так, для тетрахлорида углерода критический диаметр равен 0,69 нм, а для молекулы бензола — 0,66 нм [15–17]. При этом молекулярный вес тетрахлорида углерода в 1,97 раза выше, чем у бензола, что хорошо согласуется с экспериментальными данными и объясняет различие значений сорбционной емкости активированного угля по этим органическим растворителям.

Процесс адсорбции паров ЛОС углеродными сорбентами может происходить по различным многостадийным механизмам, включающим в себя диффузию и связывание адсорбата с поверхностью поглотителя [5, 18, 19]. Использование методов математического моделирования при анализе экспериментальных данных позволяет сделать выводы о наличии лимитирующих стадий процесса и возможном его механизме. Для расчетов использовано несколько адсорбционных моделей:

– псевдопервого порядка

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t; \tag{1}$$

– псевдovторого порядка

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}; \tag{2}$$

– кинетическое уравнение Еловича:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t. \tag{3}$$

Для определения механизма процесса адсорбции необходимо применять диффузионные модели, например Морриса — Вебера:

$$q_t = kt^{1/2} + C, \quad (4)$$

В (1)–(4) q_e , q_t — адсорбционная емкость в равновесии и в момент времени t ; k_1 , k_2 — константы скорости псевдопервого [мин^{-1}] и псевдодовторого [г/ммоль/мин] порядка; β — константа десорбции; α — начальная скорость адсорбции [$\text{г}/(\text{г} \cdot \text{мин})$]; k — константа скорости диффузии уравнения Морриса — Вебера [$\text{г}/(\text{г} \cdot \text{мин}^{1/2})$]; C — константа сопротивления массообмена в пограничном слое.

Соответствие экспериментальных и расчетных данных определяли по коэффициентам корреляции. Результаты расчетов приведены в таблице и на рис. 2. Полученная линейная зависимость в координатах уравнения псевдодовторого порядка (2) показывает лучшее совпадение с экспериментальными данными по адсорбции бензола по сравнению с кинетической моделью псевдопервого порядка (1) и моделью Еловича (3) (см. таблицу). Рассчитанные значения q_e , полученные из уравнения Лагергрена, значительно отличаются от экспериментальных, что не позволяет использовать его для описания исследуемого процесса. Аналогичные значения q_e , определенные с использованием уравнения псевдодовторого порядка, в большей степени соответствуют экспериментальным, что позволяет применять эту модель для описания адсорбции паров бензола на исследуемом активированном угле.

Результаты расчетов позволяют предположить, что в общую скорость адсорбции вклад вносит процесс хемосорбции, скорость которого определяется числом вакантных центров связывания на поверхности активированного угля.

Рассматриваемый процесс адсорбции паров бензола на активированном угле можно разделить на несколько основных стадий. Сначала протекает процесс диффузии молекул бензола к внешней поверхности активированного угля с образованием на ней пленки адсорбата. Одновременно происходит диффузия молекул бензола в поры и их адсорбция на внутренней поверхности активированного угля. Общая скорость адсорбции определяется самой медленной лимитирующей стадией [6]. Как уже было отмечено, для определения механизма процесса адсорбции необходимо применять уравнение (4).

Математическая обработка результатов показала (рис. 3), что полученная зависимость не проходит через начало координат. Поэтому процесс

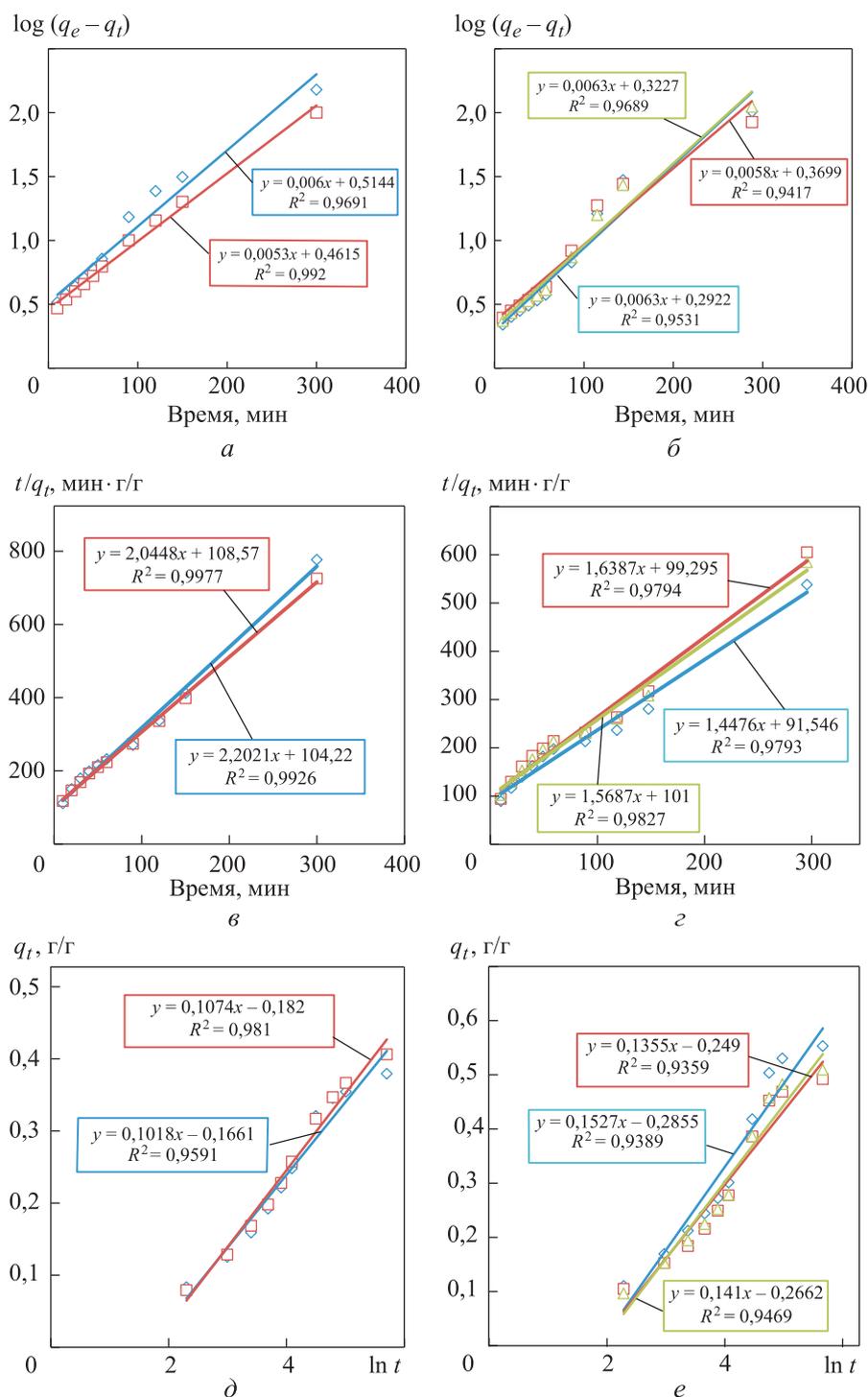


Рис. 2. Кинетика адсорбции паров бензола в координатах модели псевдопервого порядка (а, б), псевдовторого порядка (в, г) и уравнения Еловича (д, е) для угля марок АР-А (◇), АР-Б (□) (а, в, д) и Ваоjun 4.0/90 (◇), Ваоjun 3.0/80 (□), Ваоjun 3.0/85 (△) (б, г, е)

адсорбции паров бензола контролируется скоростями пленочной и внутрипоровой диффузий. Полученные зависимости имеют ярко выраженный излом, разделяющий начальный и конечный периоды процесса адсорбции, которые протекают по разным закономерностям.

Константы кинетических уравнений псевдопервого и псевдовторого порядка, уравнения Еловича и Морриса — Вебера

Кинетический параметр	Марка угля				
	AP-A	AP-B	Ваојун 3.0/80	Ваојун 3.0/85	Ваојун 4.0/90
<i>Эксперимент</i>					
q_e , мг/г	0,39	0,42	0,50	0,52	0,56
<i>Уравнение псевдопервого порядка</i>					
k_1 , мин ⁻¹	0,0138	0,1220	0,0134	0,0145	0,0145
q_e , мг/г	0,31	0,34	0,43	0,48	0,51
R^2	0,96	0,99	0,95	0,94	0,96
<i>Уравнение псевдовторого порядка</i>					
k_2 , мг/ммоль/мин	0,0465	0,0385	0,0270	0,0244	0,0229
q_e , мг/г	0,45	0,49	0,61	0,64	0,69
R^2	0,99	0,99	0,97	0,97	0,98
<i>Уравнение Еловича</i>					
α , мг/(г · мин)	0,0199	0,0197	0,0216	0,0213	0,0235
β , мг/г	9,82	9,31	7,38	7,09	6,55
R^2	0,95	0,98	0,93	0,93	0,94
<i>Уравнение Морриса — Вебера</i>					
k , мг/(г · мин ^{1/2})	0,0324	0,033	0,0487	0,0434	0,0446
C	0,0114	0,0109	0,0550	0,0459	0,0513
R^2	0,97	0,99	0,98	0,98	0,99

Заключение. При исследовании адсорбции паров бензола на активированном угле марок AP-A, AP-B и Ваојун 3.0/80, Ваојун 3.0/85, Ваојун 4.0/90 установлено, что наибольшую адсорбционную способность в отношении бензола проявляет активированный уголь марки Ваојун 4.0/90, наименьшую — марки AP-A. Обработка результатов кинетических исследований проведена с использованием уравнений псевдопервого порядка, псевдовторого порядка, упрощенного уравнения Еловича и диф-

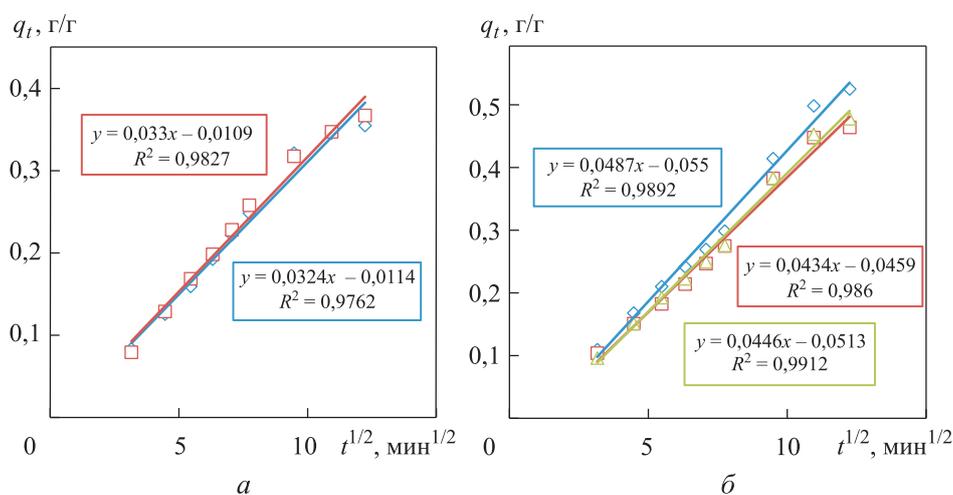


Рис. 3. Использование диффузионной модели Морриса — Вебера для описания адсорбции паров бензола на исследуемом активированном угле марок AP-A (◇), AP-B (□) (а) и Baojun 4.0/90 (◇), Baojun 3.0/80 (□), Baojun 3.0/85 (△) (б)

диффузионного уравнения Морриса — Вебера. Лучшая корреляция с экспериментальными данными получена в случае модели псевдвторого порядка. Результаты анализа использования модели Морриса — Вебера позволяют сделать вывод о контроле скорости изучаемого процесса диффузии паров бензола к поверхности угля через пленку адсорбата и дальнейшей диффузии во внутривидовом пространстве. Проведенное исследование показало, что активированный уголь марок Baojun 3.0/80, Baojun 3.0/85, Baojun 4.0/90 может быть успешно использован для поглощения вредных ЛОС вместо углей марок AP-A и AP-B.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Akpa J.G., Nmegbu C.G.J. Adsorption of benzene on activated carbon from agricultural waste materials. *Res. J. Chem. Sci.*, 2014, vol. 4, no. 9, pp. 34–40.
- [2] Huff J. Benzene-induced cancers: abridged history and occupational health impact. *Int. J. Occup. Environ. Health*, 2007, vol. 13, iss. 2, pp. 213–221. DOI: <https://doi.org/10.1179/oeh.2007.13.2.213>
- [3] Karimnezhad L., Haghghi M., Fatehifar E. Adsorption of benzene and toluene from waste gas using activated carbon activated by ZnCl₂. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 835–844. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0695-4>
- [4] Li M., Wu S.C., Peng Y., et al. Adsorption of volatile organic vapors by activated carbon derived from rice husk under various humidity conditions and its statistical evaluation by linear solvation energy relationships. *Sep. Purif. Technol.*, 2016, vol. 170, pp. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.029>

- [5] Bansal R., Goyal M. Activated carbon adsorption. CRC Press, 2005.
- [6] Yakout S.M. Removal of the hazardous, volatile, and organic compound benzene from aqueous solution using phosphoric acid activated carbon from rice husk. *Chem. Cent. J.*, 2014, vol. 52, no. 8, art. 52. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13065-014-0052-5>
- [7] Chugaev S.S., Strizhenov E.M., Zherdev A.A., et al. Fire- and explosion-safe low-temperature filling of an adsorption natural gas storage systems. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 52, no. 11-12, pp. 846–854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0281-2>
- [8] Strizhenov E.M., Zherdev A.A., Petrochenko R.V., et al. A study of methane storage characteristics of compacted adsorbent AU-1. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 52, no. 11-12, pp. 838–845. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0280-3>
- [9] Byamba-Ochir N., Shim W.G., Balathanigaimani M.S., et al. High density Mongolian anthracite based porous carbon monoliths for methane storage by adsorption. *Appl. Energy*, 2017, vol. 190, pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.124>
- [10] Nguyen T.X., Bhatia S.K. Probing the pore wall structure of nanoporous carbons using adsorption. *Langmuir*, 2004, vol. 20, iss. 9, pp. 3532–3535. DOI: <https://doi.org/10.1021/la036244p>
- [11] Segarra E.I., Glandt E.D. Model microporous carbons: microstructure, surface polarity and gas adsorption. *Chem. Eng. Sci.*, 1994, vol. 49, iss. 17, pp. 2953–2965. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)E0113-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)E0113-5)
- [12] Morris J.R., Contescu C.I., Chisholm M.F., et al. Modern approaches to studying gas adsorption in nanoporous carbon. *J. Mater. Chem. A*, 2013, vol. 33, iss. 1, pp. 9341–9350. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3ta10701a>
- [13] Wibowo N., Setyadhi L., Wibowo D., et al. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat-treated forms: influence of surface chemistry on adsorption. *J. Hazard Mater.*, 2007, vol. 146, iss. 1-2, pp. 237–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.011>
- [14] Ahmaruzzaman M., Gupta V.K. Rice husk and its ash as low-cost adsorbents in water and wastewater treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, vol. 50, iss. 24, pp. 13589–13613. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie201477c>
- [15] Mohammed J., Nasri N.S., Zaini M.A.A., et al. Adsorption of benzene and toluene onto KOH activated coconut shell based carbon treated with NH₃. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 102, pp. 245–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.012>
- [16] Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M., Gómez-Serrano V., et al. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *J. Hazard. Mater.*, 2011, vol. 187, iss. 1-3, pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>
- [17] Lillo-Ródenas M.A., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A. Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations. *Carbon*, 2005, vol. 43, iss. 8, pp. 1758–1767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.02.023>

[18] Ayawei N., Ebelegi A.N., Wankasi D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *J. Chem.*, 2017, vol. 2017, art. ID 3039817.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>

[19] Plazinski W., Rudzinski W., Plazinska A. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2009, vol. 152, iss. 1-2, pp. 2–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.009>

Касаткин Евгений Михайлович — аспирант кафедры «Физическая и коллоидная химия» РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Ахмедова Луиза Сулеймановна — аспирантка кафедры «Физическая и коллоидная химия» РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Маркова Екатерина Борисовна — канд. хим. наук, доцент кафедры «Физическая и коллоидная химия» РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); студент магистратуры факультета цифровых технологий и химического инжиниринга РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Аверина Юлия Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инновационные материалы и защита от коррозии» РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Чередниченко Александр Генрихович — д-р хим. наук, заведующий кафедрой «Физическая и коллоидная химия» РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Касаткин Е.М., Ахмедова Л.С., Маркова Е.Б. и др. Изучение процесса адсорбции паров бензола активированными углями марок AP-A, AP-B и углями компании *Baojun Activated Carbon*. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 4 (103), с. 110–124.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-110-124>

INVESTIGATION OF BENZENE VAPORS ADSORPTION BY ACTIVATED CARBONS AR-A, AR-B AND *Baojun Activated Carbon's* COALS

E.M. Kasatkin¹

kasatkin.1991@list.ru

L.S. Akhmedova¹

luisaakhmedova@gmail.com

E.B. Markova¹

ebmarkova@gmail.com

V.S. Boldyrev^{2,3}

boldyrev.v.s@bmstu.ru

Yu.M. Averina³

averinajm@mail.ru

A.G. Cherednichenko¹

cherednichenko-ag@rudn.ru

¹ RUDN University, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

Abstract

We presented the results of a study of the adsorption capacity of domestic activated carbon grades AR-A and AR-B, and a coal from *Baojun Activated Carbon* (China) with respect to benzene vapor. All used adsorbents are designed to purify air from vapors of volatile organic compounds, but differ in production technology and physicochemical characteristics. It has been established that the efficiency of *Baojun Activated Carbon's* activated carbon in the adsorption of benzene vapor is higher than that of domestic samples of AR-A and AR-B grades. At the same time, among foreign-made coal, the most effective sample was *Baojun* 4.0/90, which has a high adsorption capacity, declared in relation to carbon tetrachloride vapor. It has been experimentally shown that in all cases the kinetics of the adsorption process is well described by the Ho and MacKay pseudo-second order equation. Similar results were obtained using the Morris — Weber model, which takes into account the role of diffusion processes in the adsorption of benzene vapor by activated carbons. The use of the Lagergren equation and the simplified Elovich model for processing experimental data showed less significant results

Keywords

Gas adsorption, activated carbon, volatile organic compounds, purification of gas emissions, environmental protection

Received 20.05.2021

Accepted 11.06.2021

© Author(s), 2022

This work has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program

REFERENCES

- [1] Akpa J.G., Nmegbu C.G.J. Adsorption of benzene on activated carbon from agricultural waste materials. *Res. J. Chem. Sci.*, 2014, vol. 4, no. 9, pp. 34–40.
- [2] Huff J. Benzene-induced cancers: abridged history and occupational health impact. *Int. J. Occup. Environ. Health*, 2007, vol. 13, iss. 2, pp. 213–221. DOI: <https://doi.org/10.1179/oeh.2007.13.2.213>
- [3] Karimnezhad L., Haghighi M., Fatehifar E. Adsorption of benzene and toluene from waste gas using activated carbon activated by ZnCl₂. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 835–844. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0695-4>
- [4] Li M., Wu S.C., Peng Y., et al. Adsorption of volatile organic vapors by activated carbon derived from rice husk under various humidity conditions and its statistical evaluation by linear solvation energy relationships. *Sep. Purif. Technol.*, 2016, vol. 170, pp. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.029>
- [5] Bansal R., Goyal M. Activated carbon adsorption. CRC Press, 2005.
- [6] Yakout S.M. Removal of the hazardous, volatile, and organic compound benzene from aqueous solution using phosphoric acid activated carbon from rice husk. *Chem. Cent. J.*, 2014, vol. 52, no. 8, art. 52. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13065-014-0052-5>
- [7] Chugaev S.S., Strizhenov E.M., Zherdev A.A., et al. Fire- and explosion-safe low-temperature filling of an adsorption natural gas storage systems. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 52, no. 11-12, pp. 846–854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0281-2>
- [8] Strizhenov E.M., Zherdev A.A., Petrochenko R.V., et al. A study of methane storage characteristics of compacted adsorbent AU-1. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 52, no. 11-12, pp. 838–845. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0280-3>
- [9] Byamba-Ochir N., Shim W.G., Balathanigaimani M.S., et al. High density Mongolian anthracite based porous carbon monoliths for methane storage by adsorption. *Appl. Energy*, 2017, vol. 190, pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.124>
- [10] Nguyen T.X., Bhatia S.K. Probing the pore wall structure of nanoporous carbons using adsorption. *Langmuir*, 2004, vol. 20, iss. 9, pp. 3532–3535. DOI: <https://doi.org/10.1021/la036244p>
- [11] Segarra E.I., Glandt E.D. Model microporous carbons: microstructure, surface polarity and gas adsorption. *Chem. Eng. Sci.*, 1994, vol. 49, iss. 17, pp. 2953–2965. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)E0113-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)E0113-5)
- [12] Morris J.R., Contescu C.I., Chisholm M.F., et al. Modern approaches to studying gas adsorption in nanoporous carbon. *J. Mater. Chem. A*, 2013, vol. 33, iss. 1, pp. 9341–9350. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3ta10701a>
- [13] Wibowo N., Setyadhi L., Wibowo D., et al. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat-treated forms: influence of surface chemistry on adsorption. *J. Hazard Mater.*, 2007, vol. 146, iss. 1-2, pp. 237–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.011>

[14] Ahmaruzzaman M., Gupta V.K. Rice husk and its ash as low-cost adsorbents in water and wastewater treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, vol. 50, iss. 24, pp. 13589–13613. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie201477c>

[15] Mohammed J., Nasri N.S., Zaini M.A.A., et al. Adsorption of benzene and toluene onto KOH activated coconut shell based carbon treated with NH₃. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 102, pp. 245–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.012>

[16] Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M., Gómez-Serrano V., et al. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *J. Hazard. Mater.*, 2011, vol. 187, iss. 1-3, pp. 1–23.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>

[17] Lillo-Ródenas M.A., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A. Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations. *Carbon*, 2005, vol. 43, iss. 8, pp. 1758–1767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.02.023>

[18] Ayawei N., Ebelegi A.N., Wankasi D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *J. Chem.*, 2017, vol. 2017, art. ID 3039817.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>

[19] Plazinski W., Rudzinski W., Plazinska A. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2009, vol. 152, iss. 1-2, pp. 2–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.009>

Kasatkin E.M. — Post-Graduate Student, Department of Physical and Colloidal Chemistry, RUDN University (Miklukho-Maklaya ul. 6, Moscow, 117198 Russian Federation).

Akhmedova L.S. — Post-Graduate Student, Department of Physical and Colloidal Chemistry, RUDN University (Miklukho-Maklaya ul. 6, Moscow, 117198 Russian Federation).

Markova E.B. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Physical and Colloidal Chemistry, RUDN University (Miklukho-Maklaya ul. 6, Moscow, 117198 Russian Federation).

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University; Head of the Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Master Student, Faculty of Digital Technology and Chemical Engineering, Mendeleev University Technology (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Averina Yu.M. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Innovative Materials and Corrosion Protection, Mendeleev University of Chemical Technology (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Cherednichenko A.G. — Dr. Sc. (Chem.), Head of the Department of Physical and Colloidal Chemistry, RUDN University (Miklukho-Maklaya ul. 6, Moscow, 117198 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kasatkin E.M., Akhmedova L.S., Markova E.B., et al. Investigation of benzene vapors adsorption by activated carbons AR-A, AR-B and *Baojun Activated Carbon's* coals. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 4 (103), pp. 110–124 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-110-124>