Научная статья
УДК 544.723.212
DOI: 10.37482/0536-1036-2026-5-167-179

Адсорбция паров ароматических летучих соединений модифицированным активированным углем БАУ-А

Ткабо Тевельде Сахле*✉*, аспирант; ResearcherID: NOF-8374-2025,
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8200-9445
А.Г. Чередниченко, д-р хим. наук, чл.-кор. РИА; ResearcherID: C-1311-2018,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4709-5313
Е.Б. Маркова, канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: G-1868-2016,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2735-2893
А.П. Глинушкин, д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН; ResearcherID: E-7331-2016,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1757-0347
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия; tkabotewelde@gmail.com✉, cherednichenko-ag@rudn.ru, markova-eb@rudn.ru, glinushkin-ap@rudn.ru

Поступила в редакцию 09.01.26 / Одобрена после рецензирования 23.03.26 / Принята в печать 27.03.26

Аннотация. Приведены результаты модифицирования промышленного березового активированного угля марки БАУ-А российского производства и его использования для адсорбции паров бензола, толуола и ксилола. Модифицированный образец адсорбента был получен путем химической обработки исходного активированного угля 0,5 М водным раствором лимонной кислоты с последующей сушкой и активацией при температуре 300 °С. Определение удельной сорбционной емкости исходного активированного угля БАУ-А и его модифицированного аналога мБАУ-А, а также кинетические закономерности процесса адсорбции паров бензола, толуола и изомерами ксилола проводили гравиметрическим методом при 25 °С и атмосферном давлении. Полученные кинетические данные были проанализированы с использованием моделей псевдопервого, псевдовторого порядка, Еловича и Морриса–Вебера. Результаты показали, что модификация лимонной кислотой заметно увеличивает удельную адсорбционную емкость сорбента (7,4–14,0 %). При этом наибольшее улучшение было отмечено для паров *о*-ксилола. Закономерности адсорбции паров бензола и толуола для исходного и модифицированного угольного адсорбента хорошо описывались кинетическими уравнениями псевдовторого порядка, что указывает на лимитирующий характер процесса хемосорбции молекул адсорбата. Для адсорбции паров *о*-ксилола и *п*-ксилола кинетические данные лучше соответствовали уравнению псевдопервого порядка, что предполагает лимитирующий характер стадии физической адсорбции. Наблюдаемый при использовании модели Морриса–Вебера результат также хорошо согласовывался с экспериментальными данными, что свидетельствует о возможном вкладе диффузионных процессов в рассматриваемое поглощение паров ароматических соединений. Наблюдаемый эффект улучшения технических характеристик у модифицированного активированного угля по сравнению с исходным адсорбентом обусловлен появлением кислотных функциональных групп на его поверхности, которые облегчают связывание молекул адсорбата и увеличивают показатели удельной адсорбционной емкости. Полученные результаты демонстрируют, что модификация лимонной кислотой повышает адсорбционные характеристики про-

© Сахле Т.Т., Чередниченко А.Г., Маркова Е.Б., Глинушкин А.П., 2026
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

мышленного активированного угля БАУ-А, увеличивая его конкурентные преимущества по отношению к другим маркам угольных адсорбентов, в т. ч. импортных.

Ключевые слова: березовый активированный уголь, адсорбция паров ароматических соединений, модификация активированных углей, очистка воздуха, экологическая безопасность

Для цитирования: Сахле Т.Т., Чередниченко А.Г., Маркова Е.Б., Глинушкин А.П. Адсорбция паров ароматических летучих соединений модифицированным активированным углем БАУ-А // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 5. С. 167–179. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-167-179

Original article

Adsorption of Vapor of Aromatic Volatile Compounds by Modified BAU-A Activated Carbon

Tkabo Tewelde Sahle ✉***,*** *Postgraduate Student;* ResearcherID: NOF-8374-2025, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8200-9445
Alexander G. Cherednichenko, *Doctor of Chemistry, Corresponding Member of RAS;* ResearcherID: C-1311-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4709-5313
Ekaterina B. Markova, *Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.;* ResearcherID: G-1868-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2735-2893
Alexey P. Glinushkin, *Doctor of Agriculture, Prof., Academician of RAS;* ResearcherID: E-7331-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1757-0347
Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia;
tkabotewelde@gmail.com✉, cherednichenko-ag@rudn.ru, markova-eb@rudn.ru, glinushkin-ap@rudn.ru

Received on January 9, 2026 / Approved after reviewing on March 23, 2026 / Accepted on March 27, 2026

Abstract. The article presents the results of modifying Russian-made industrial birch BAU-A activated carbon and its use for the vapor adsorption of benzene, toluene and xylene (BTK). The modified adsorbent sample was obtained by chemical treatment of the original activated carbon with 0.5 M aqueous citric acid solution, followed by drying and activation at 300 °C. The specific sorption capacity of the original activated carbon (BAU-A) and its modified analog (mBAU-A), as well as the kinetic patterns of the vapor adsorption of benzene, toluene, and xylene isomers, were determined by gravimetric analysis at 25 °C and atmospheric pressure. The kinetic data obtained were analyzed using the pseudo-first order, pseudo-second order, Yelovich, and Morris-Weber models. The results showed that modification with citric acid significantly increases the specific adsorption capacity of the sorbent (7.4–14.0 %). The greatest improvement was observed for *o*-xylene vapors. The adsorption behavior of benzene and toluene vapors on both the original and modified carbon adsorbents was well described by the pseudo-second order kinetic equations, indicating the limiting nature of the adsorbate molecules chemisorption. The kinetic data for the adsorption of *o*-xylene and *p*-xylene vapors were better described by the pseudo-first order equation, suggesting the limiting nature of the physical adsorption stage. The results obtained using the Morris-Weber model were also in good agreement with the experimental data, suggesting a possible contribution of diffusion processes to vapor absorption of the aromatic

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

compounds. The observed improvement in the technical performance of the modified activated carbon compared to the original adsorbent is due to the formation of acidic functional groups on its surface, which facilitate the binding of adsorbate molecules and increase the specific adsorption capacity. Overall, modification with citric acid improves the adsorption properties of the industrial BAU-A activated carbon, enhancing its competitive advantages over other brands of carbon adsorbents, including foreign ones.

Keywords: birch activated carbon, vapor adsorption of aromatic compounds, modification of activated carbons, air purification, environmental safety

For citation: Sahle T.T., Cherednichenko A.G., Markova E.B., Glinushkin A.P. Adsorption of Vapor of Aromatic Volatile Compounds by Modified BAU-A Activated Carbon. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 5, pp. 167–179. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-167-179

Введение

В настоящее время угольные адсорбенты широко используются в мире для решения различных задач в пищевой промышленности, очистке питьевой воды и атмосферы, катализе, энергетике, медицине, фармацевтике [9, 22, 23]. Масштабы российского рынка производства и потребления активированных углей оцениваются к 2026 г. в 30 млрд рублей, а мировой среднегодовой темп роста рынка должен составить около 9,6 % [1]. Среди этих материалов заметное место занимают адсорбенты, производимые из растительного сырья, в списке которых по объемам производства и широте использования необходимо выделить березовый активированный уголь марки БАУ-А российского производства с высокими техническими характеристиками [25]. Актуальность и практическое значение использования угольных адсорбентов стимулируют постоянные исследования в этой области, которые привели к разработке и промышленному производству новых сорбционных материалов с более высокими показателями. К ним можно отнести активированные угли, получаемые из скорлупы кокосовых орехов [20]. Одним из способов улучшения потребительских свойств известных активированных углей является их химическая модификация. Поэтому задача разработки новых адсорбентов путем модифицирования известных промышленных материалов аналогичного назначения является актуальной.

Летучие органические соединения (ЛОС) – это широкий класс органических химических веществ, которые легко испаряются при комнатной температуре и атмосферном давлении, представляя значительную угрозу окружающей среде и здоровью человека [8, 17]. Среди них интересны ароматические органические соединения (бензол, толуол и изомеры ксилола). Дело в том, что в процессах термокаталитической переработки нефти получают не только эти индивидуальные ароматические соединения, но также их смеси, известные как фракция БТК (бензол-толуол-ксилол). Из-за их крупномасштабного промышленного производства, широкого практического применения, экологической опасности, избирательной токсичности и неблагоприятных последствий для здоровья человека эти вещества вызывают повышенную обеспокоенность научного сообщества [14]. Соединения БТК в основном выбрасываются в окружающую среду в результате различных антропогенных видов деятельности, включая промышленные процессы (нефтехимиче-

скую переработку, производство пластмасс и фармацевтических препаратов), транспортировку и хранение углеводородов, выбросы от эксплуатации транспортных средств и использование их в качестве растворителей [15, 26]. Их присутствие в атмосфере и водных ресурсах может привести к целому ряду проблем со здоровьем, включая неврологические и онкологические заболевания, репродуктивные расстройства [7, 19]. Учитывая токсичность и повсеместное использование органических ароматических соединений, разработка эффективных и экономически целесообразных технологий их удаления, наряду с переработкой пластиковых отходов [6] является обязательным условием для защиты здоровья населения и экосистем. Среди существующих технологий адсорбция паров ЛОС активированными углями является универсальным и широко распространенным подходом благодаря своей относительно низкой стоимости и эксплуатационной простоте [4, 5].

Объекты и методы исследования

В эксперименте в качестве адсорбентов использовали промышленный активированный уголь марки БАУ-А (ГОСТ 6217–74) и его модифицированный аналог mБАУ-А. В качестве реагентов применяли бензол (99,96 %), толуол (99,9 %), *о*-ксилол (99,7 %), *п*-ксилол (99,0 % чистоты), а также моногидрат лимонной кислоты ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) согласно ГОСТ 908–2004, производства компании «ХимМед» (Россия).

В процессе модификации активированный уголь БАУ-А (10,0 г) помещали в 100 мл 0,5 М водного раствора моногидрата лимонной кислоты ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$). Полученную смесь помещали в химический стакан объемом 250 мл и непрерывно перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 24 ч при комнатной температуре. После пропитки смесь фильтровали, выделенный активированный уголь промывали дистиллированной водой до достижения нейтрального показателя pH фильтрата. Модифицированный сорбент сушили в сушильном шкафу (Binder RF 115) при температуре 105 °С до постоянной массы, а затем подвергали термической активации в муфельной печи (SNOL 3/1100) в инертной атмосфере при температуре 300 °С в течение 2 ч. Полученный модифицированный активированный уголь охлаждали до комнатной температуры, хранили в эксикаторе с осушителем до проведения экспериментов по адсорбции паров органических растворителей и обозначали как mБАУ-А. Измерение удельной поверхности исходного и модифицированного образцов сорбента проводили известным методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием установки Micromeritics ASAP 2020 [9, 13]. Сравнительную оценку кислотных свойств поверхности сорбента до и после модификации осуществляли по результатам адсорбции пиридина из его раствора в октане [9, 22]. Регистрацию ИК-спектров образцов проводили на приборе Shimadzu IR Spirit) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Кинетику адсорбции паров ароматических соединений на промышленном и модифицированном активированном угле исследовали гравиметрическим методом при комнатной температуре и атмосферном давлении. Для определения массы (г) адсорбированного адсорбата на 1 г активированного угля использовали следующую формулу:

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

где m_0 и m_t – масса активированного угля в начале эксперимента и в текущий момент времени соответственно.

Равновесное значение удельной адсорбции (q_e) каждого активированного угля в равновесном состоянии определяли по прекращению изменения массы адсорбента во времени. Для исследования кинетики процесса адсорбции паров бензола, толуола и изомеров ксилола определяли гравиметрическим методом изменение массы поглощенного вещества во времени. Полученные экспериментальные данные анализировали с использованием кинетических уравнений Лагергрена псевдопервого порядка (2), псевдовторого порядка Хо–Маккея (1), модели Еловича (2) и диффузионной модели Морриса–Вебера (3) для определения механизма процесса.

$$\log\left(q_e - q_t\right) = \log\left(q_e\right) - \frac{k_1}{2,303} t, \quad (1)$$

где k_1 – константа скорости псевдопервого порядка.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^{\,2}} + \frac{t}{q_e}, \quad (2)$$

где k_2 – константа скорости псевдовторого порядка.

$$q_t = \frac{1}{\beta} \times \ln\left(\alpha\beta\right) + \frac{1}{\beta} \ln t, \quad (3)$$

где α – начальная скорость адсорбции.

$$q_t = kt^{1/2} + C,$$

где k – константа скорости диффузии уравнения Морриса–Вебера, г/г·мин$^{1/2}$; C – постоянная сопротивления массообмену в пограничном слое.

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс адсорбции паров органических ароматических соединений включает в себя сложные физические и химические взаимодействия, на которые влияют площадь удельной поверхности активированного угля, распределение пор по размерам и кислотно-основные свойства поверхности, определяющие сродство адсорбента к ароматическим соединениям [8, 11, 12]. Характерные для коммерческих активированных углей ограничения, такие как недостаточная адсорбционная способность по отношению к ЛОС, возможно преодолеть путем выбора правильной стратегии их модификации. Физическая или химическая модификация активированного угля может значительно улучшить его адсорбционные свойства за счет селективной адаптации химического состава и свойств поверхности к адсорбату, введения определенных функциональных групп и создания необходимого распределения пористости [2]. Химическая модификация промышленных адсорбентов является наиболее простым способом увеличения их эффективности и открывает стратегические возможности для повышения их коммерческого потенциала [3, 13, 24].

Кинетические профили адсорбции паров бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола на коммерческом и модифицированном лимонной кислотой БАУ-А представлены на рис. 1. Они иллюстрируют изменения удельной ад-

сорбционной емкости адсорбента в зависимости от продолжительности процесса при комнатной температуре и атмосферном давлении. Кинетика адсорбции толуола и бензола как на БАУ-А, так и на модифицированном лимонной кислотой БАУ-А продемонстрировала характерный двухзонный профиль. Действительно, первоначально скорость адсорбции высокая, о чем свидетельствует резкое увеличение удельной адсорбционной емкости в течение первых 60 мин (рис. 1, *а*, *б*).

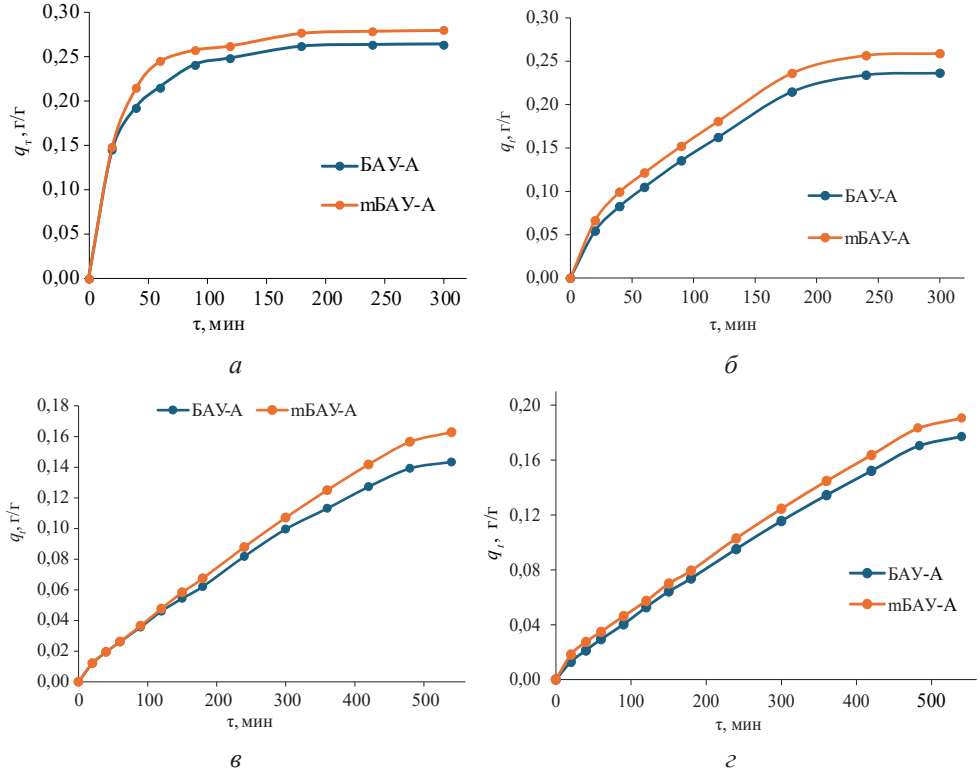


Рис. 1. Кинетика адсорбции бензола (*а*), толуола (*б*), *о*-ксилола (*в*) и *п*-ксилола (*г*) коммерческим БАУ-А и модифицированным mБАУ-А активированными углями

Fig.1. Kinetics of benzene (*а*), toluene (*б*), *o*-xylene (*в*), and *p*-xylene (*г*) adsorption by commercial BAU-A and modified mBAU-A active carbons

Эта начальная быстрая фаза объясняется наличием легкодоступных участков адсорбции на поверхности углеродного адсорбента и высоким концентрационным градиентом у адсорбатов, вызывающих массоперенос их молекул из газовой фазы на поверхность сорбента. С течением времени скорость адсорбции постепенно уменьшается, что отражается в снижении наклона кривой зависимости удельной адсорбционной емкости от продолжительности процесса. Вторая медленная фаза связана с прогрессирующим занятием доступных адсорбционных центров, что приводит к усилению конкуренции между молекулами адсорбата и снижению движущей силы массопереноса. Кинетика адсорбции *о*-ксилола и *п*-ксилола на БАУ-А и модифицированном mБАУ-А имеет тенденцию, аналогичную той, которая наблюдается для бензола и толуола. Первоначально скорость адсорбции относительно высока, затем темпы замедляются, приближаясь к равновесию, которое достигается примерно через 480 мин (рис. 1, *в*, *г*).

Модификация БАУ-А лимонной кислотой увеличила адсорбцию паров всех использованных растворителей (бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола), о чем свидетельствуют более высокие значения q_t во все моменты времени по сравнению с немодифицированным БАУ-А. Этот факт позволяет предположить, что введение кислотных функциональных групп создает более благоприятные взаимодействия между поверхностью адсорбента и ароматическими кольцами толуола и бензола за счет усиления π-π взаимодействий или образования водородных связей [10, 16, 18, 21]. Наблюдаемая для mБАУ-А повышенная начальная скорость адсорбции паров ароматических ЛОС также может быть связана с увеличением доступности центров адсорбции за счет изменения текстурных свойств поверхности [9]. Действительно, заметное увеличение кислотных свойств поверхности исходного БАУ-А (0,131 ммоль/г) к модифицированному сорбенту mБАУ-А (0,157 ммоль/г) было зарегистрировано в результате проведения пиридинового теста. При этом текстурные свойства поверхности заметного вклада в зарегистрированные изменения сорбционных свойств после модифицирования активированного угля не вносят, т. к. наблюдалось лишь незначительное уменьшение удельной поверхности у модифицированного сорбента (520 ± 7 м^2/г) по сравнению с исходным активированным углем (41 ± 8 м^2/г) и отсутствие изменений в поровом распределении. Анализ ИК-спектров порошков исходного и модифицированного активированного угля показал, что в случае модифицированного образца наблюдается некоторое увеличение поглощения в области 1750 см$^{-1}$ и меняется общий профиль спектра. Однако указанные изменения не могут быть признаны характеристическими и информативными (твердофазные образцы, широкие полосы), хотя соответствуют области колебаний карбоксильных и карбонильных групп.

По сравнению с бензолом и толуолом общая скорость адсорбции *о*-ксилола и *п*-ксилола была заметно ниже. Это, предположительно, связано с большим размером молекул изомеров ксилола, что может замедлять их диффузию в порах активированного угля и приводить к стерическим препятствиям во взаимодействии с центрами адсорбции [18]. В то время как модификация лимонной кислотой усиливает адсорбцию паров ксилолов угольным адсорбентом и увеличивает его удельную сорбционную емкость, изменение в скорости адсорбции менее выражено, чем наблюдаемое для паров бензола и толуола. Это говорит о том, что кислотные функциональные группы, вводимые при модификации в состав адсорбента, менее эффективно взаимодействуют с изомерами ксилола по сравнению с более простыми ароматическими молекулами бензола и толуола, вероятно, из-за стерических ограничений [18].

Модификация активированного угля БАУ-А лимонной кислотой привела к повышению равновесной удельной адсорбционной способности для всех растворителей (рис. 2). В частности, она увеличила адсорбционную способность *о*-ксилола, толуола, *п*-ксилола и бензола на 13,97; 8,43; 7,59 и 7, 39 % соответственно. Полученное изменение было наиболее выражено для *о*-ксилола, что может быть обусловлено особенностями строения адсорбата и его несколько более высокой поляризуемостью по сравнению с остальными изученными ароматическими соединениями, которые обеспечивают большее сродство к центрам адсорбции, чем у *п*-ксилола.

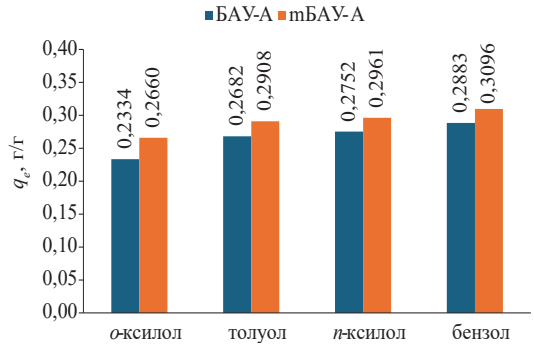


Рис. 2. Равновесная удельная адсорбционная емкость исходного БАУ-А и модифицированного mБАУ-А активированных углей для адсорбции паров бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола

Fig. 2. Equilibrium specific adsorption capacity of the original BAU-A and modified mBAU-A activated carbons for vapor adsorption of benzene, toluene, *o*-xylene and *p*-xylene

Результаты кинетических исследований процесса адсорбции бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола (рис. 3) исходным и модифицированным БАУ-А были дополнительно проанализированы с использованием кинетических моделей псевдопервого, псевдовторого порядка и Еловича, а также диффузионной модели Морриса–Вебера [10]. Полученные кинетические параметры и коэффициенты корреляции приведены в табл. 1.

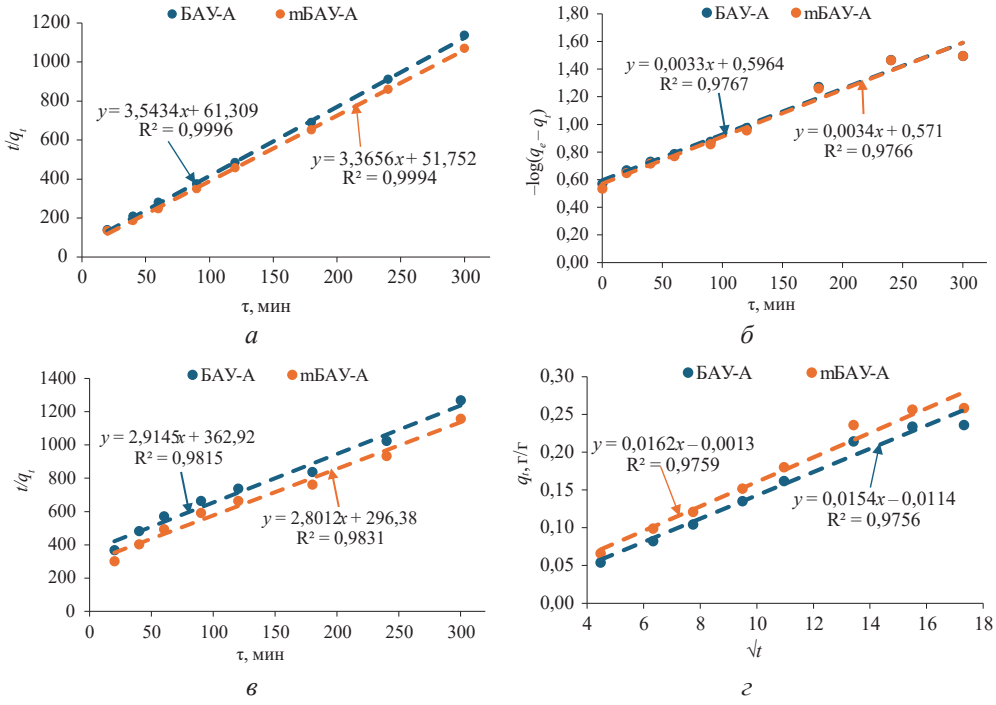


Рис. 3. Кинетика адсорбции паров бензола в координатах модели псевдовторого порядка (*а*); паров толуола в координатах моделей псевдопервого порядка (*б*); псевдовторого порядка (*в*) и модели Морриса–Вебера (*г*)

Fig. 3. Adsorption kinetics of benzene vapors in the pseudo-second order (*a*) model coordinates; toluene vapors in the pseudo-first order (*б*); pseudo-second order (*в*) and Morris-Weber (*г*) models coordinates

Таблица 1

Кинетические параметры адсорбции бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола промышленным и модифицированнным адсорбентом БАУ-А
Kinetic Parameters of Adsorption of Benzene, Toluene, *o*-Xylene and *p*-Xylene by Industrial and Modified BAU-A Adsorbent

Кинетический параметр	Бензол		Толуол		*О*-ксилол		*П*-ксилол	
	БАУ-А	mБАУ-А	БАУ-А	mБАУ-А	БАУ-А	mБАУ-А	БАУ-А	mБАУ-А
Эксперимент								
q_e, г/г	0,2883± 0,0031	0,3096± 0,0037	0,2682± 0,0034	0,2908± 0,0040	0,2334± 0,0021	0,2660± 0,0023	0,2752± 0,0030	0,2961± 0,0031
Уравнение псевдопервого порядка								
k_1, мин$^{-1}$	0,0074	0,0067	0,0076	0,0078	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
q_e, г/г	0,1402	0,1433	0,2533	0,2685	0,2323	0,2684	0,2786	0,2969
R^2	0,7935	0,7426	0,9767	0,9766	0,9975	0,9972	0,9967	0,9958
Уравнение псевдовторого порядка								
k_2, г/г·мин	0,2048	0,2189	0,0234	0,0079	0,0047	0,0026	0,0026	0,0041
q_e, г/г	0,2822	0,2971	0,3431	0,3570	0,3194	0,4329	0,4529	0,3934
R^2	0,9996	0,9994	0,9815	0,9831	0,8894	0,8316	0,8672	0,8079
Уравнение Еловича								
α, г/г·мин	0,0840	0,1088	0,0061	0,0073	0,0015	0,0016	0,0017	0,0020
β, г/г	22,6757	22,0751	13,4048	12,7389	23,0947	20,3666	20,0000	18,0505
R^2	0,9298	0,8726	0,9672	0,9687	0,8973	0,8849	0,8801	0,8786
Уравнение Морриса–Вебера								
k	0,0084	0,0085	0,0154	0,0162	0,0076	0,0086	0,0093	0,0098
C	0,1394	–0,1554	–0,0114	–0,0013	–0,0320	–0,0402	–0,0427	–0,0411
R^2	0,8027	0,7251	0,9756	0,9759	0,9880	0,9844	0,9856	0,9820

Кинетика адсорбции *о*-ксилола и *п*-ксилола на БАУ-А и mБАУ-А (рис. 4) лучше всего описывается кинетической моделью псевдопервого порядка, на которую указывают самые высокие коэффициенты корреляции ($R^2 > 0,99$) и хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений равновесной удельной сорбционной емкости. Кинетическая модель псевдопервого порядка предполагает, что физическая адсорбция в этом случае является лимитирующей стадией всего рассматриваемого процесса. Использование диффузионной модели Морриса–Вебера также показало высокие коэффициенты корреляции ($R^2 > 0,98$) между экспериментальными и расчетными данными, что свидетельствует о вкладе диффузии в рассматриваемый механизм адсорбции.

Кроме того, отрицательные значения константы (C) свидетельствуют об эффекте внешнего массопереноса молекул адсорбата к поверхности адсорбента на начальной стадии процесса адсорбции.

Модификация лимонной кислотой приводила к небольшому увеличению экспериментальных и расчетных значений при использовании кинетической модели псевдопервого порядка для адсорбции паров *о*-ксилола и *п*-ксилола по сравнению с исходным активированным углем БАУ-А, что говорит об увеличении удельной адсорбционной емкости модифицированного материала при сохранении скорости адсорбции молекул этих органических растворителей.

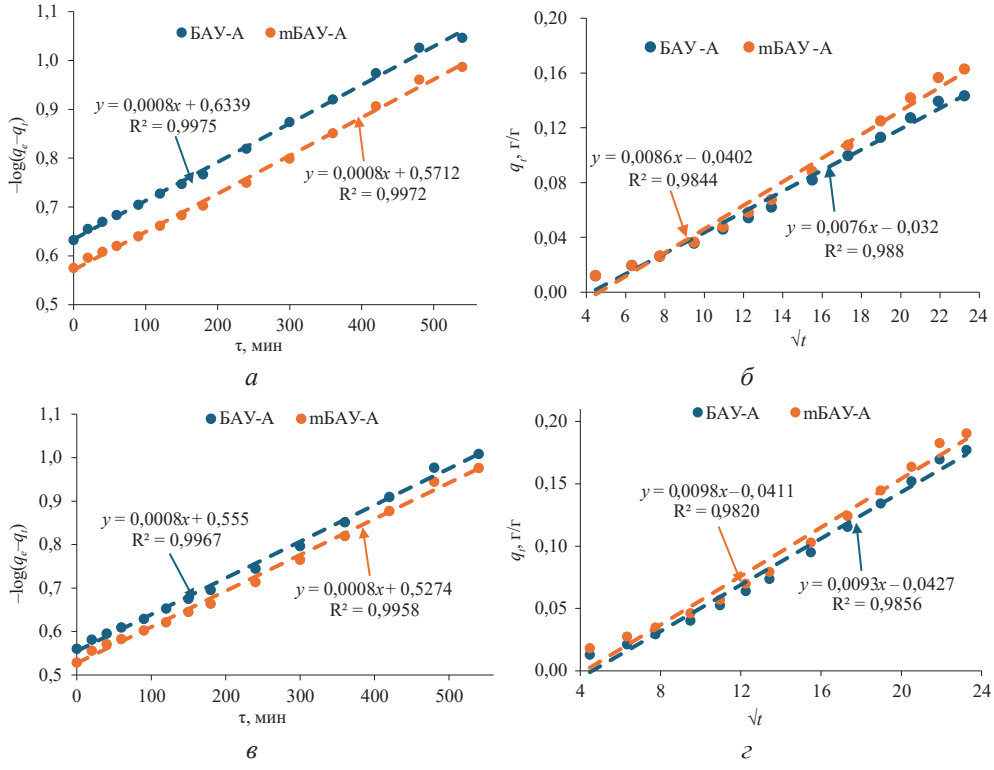


Рис. 4. Кинетика адсорбции паров *о*-ксилола в координатах моделей псевдопервого порядка (*а*) и Морриса-Вебера (*б*); паров *п*-ксилола в координатах моделей псевдопервого порядка (*в*) и модели Морриса–Вебера (*г*) с использованием адсорбентов БАУ-А и мБАУ-А

Fig. 4. Adsorption Kinetics of *o*-xylene vapors in the pseudo-first order (*а*) and Morris-Weber (*б*) models coordinates; *p*-xylene vapors in the of the pseudo-first order (*в*) and Morris-Weber (*г*) models coordinates by BAU-A and mBAU-A adsorbents

Предложенный подход получения модифицированных активированных углей позволил реализовать возможность синтеза новых угольных адсорбентов на основе промышленных марок с улучшенными техническими характеристиками и изучить особенности механизма адсорбции ими паров известных ароматических легколетучих органических растворителей.

Заключение

Модификация активированного угля марки БАУ-А с использованием моногидрата лимонной кислоты заметно улучшила его емкостные адсорбционные свойства по отношению к парам бензола, толуола, *о*-ксилола и *п*-ксилола (от 7,4 % для бензола до 14,0 % для *о*-ксилола). Модифицированный угольный адсорбент мБАУ-А показал высокую скорость адсорбции паров бензола и толуола, кинетика которой хорошо описывается уравнением псевдовторого порядка. Это указывает на лимитирующий характер стадии хемосорбции молекул адсорбата на поверхности адсорбента. Сравнение характеристик модифицированного образца мБАУ-А с показателями промышленного адсорбента БАУ-А по адсорбции паров бензола показало заметное преимущество полученного материала мБАУ-А в значениях удельной ад-

сорбционной емкости (0,31 и 0,24 г/г соответственно). Для адсорбции паров *о*-ксилола и *п*-ксилола экспериментальные данные хорошо описываются уравнением псевдопервого порядка, что предполагает лимитирующий характер стадии физической адсорбции адсорбата на поверхности адсорбента. Сравнительный анализ также показал хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных при использовании диффузионной модели Моррис–Вебера, что свидетельствует о необходимости учета процессов диффузии при рассмотрении механизма исследуемых процессов. Повышение эффективности модифицированного активированного адсорбента мБАУ-А по отношению к исходному БАУ-А обусловлено увеличением поверхностной реакционной способности и доступности центров адсорбции, за счет дополнительно индуцированных при обработке лимонной кислотой кислотных функциональных групп. Выявленные особенности механизмов процесса адсорбции паров ароматических летучих органических соединений связаны с различием в их строении и свойствах. Предложенный подход получения модифицированных сорбентов позволил синтезировать на основе активированного угля БАУ-А новый адсорбционный материал с улучшенными техническими характеристиками для решения вопросов очистки воздуха от паров бензола, толуола и изомеров бензола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Activated Carbon in Russia, the EAEU and the World: Production, Market and Forecast*. INFOMINE Research Group S.L., 2026. 192 p.

2. Anjum H., Johari K., Appusamy A., Gnanasundaram N., Thanabalan M. Surface Modification and Characterization of Carbonaceous Adsorbents for the Efficient Removal of Oil Pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 379, art. 120673. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.066

3. Awad A.M., Shaikh S.M.R., Jalab R., Gulied M.H., Nasser M.S., Benamor A., et al. Adsorption of Organic Pollutants by Natural and Modified Clays: A Comprehensive Review. *Separation and Purification Technology*, 2019, vol. 228, art. 115719. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719

4. Azhagapillai P., Shoaibi A.A., Chandrasekar S. Surface Functionalization Methodologies on Activated Carbons and Their Benzene Adsorption. *Carbon Letters*, 2021, vol. 31, pp. 419–426. https://doi.org/10.1007/s42823-020-00170-w

5. Bordun I., Vasylinych T., Malovanyy M., Sakalova H., Liubchak L., Luchyt L. Study of Adsorption of Differently Charged Dyes by Carbon Adsorbents. *Desalination and Water Treatment*, 2023, vol. 288, pp. 151–158. https://doi.org/10.5004/DWT.2023.29332

6. Cherednichenko A.G., Markova E.B., Sheshko T.F., Morozova E.A. Thermal-Catalytic Destruction of Polyolephin Polymers in Presence of $LnVO_3$ and $LnVO_4$. *Catalysis Today*, 2021, vol. 379, pp. 80–86. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.03.012

7. Chin W.-S., Huang C.-C., Chen Y.-C., Hsu J.-F., Wu C.-D., Lin P., et al. BTEX Exposure and Metabolite Levels in Taiwan Schoolchildren near Petrochemical Areas. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2025, vol. 266, art. 114545. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2025.114545

8. Demiral I., Samdan C., Demiral H. Enrichment of the Surface Functional Groups of Activated Carbon by Modification Method. *Surfaces and Interfaces*, 2021, vol. 22, art. 100873. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100873

9. Dipheko T.D., Maximov V.V., Osman M.E., Eliseev O.L., Cherednichenko A.G., Sheshko T.F. et al. Synthesis of Oxygenated Hydrocarbons from Ethanol over Sulfided

KCoMo-Based Catalysts: Influence of Novel Fiber- and Powder-Activated Carbon Supports. *Catalysts*, 2022, vol. 12, iss. 12, art. 1497. https://doi.org/10.3390/catal12121497

10. Guo X., Wang J. A General Kinetic Model for Adsorption: Theoretical Analysis and Modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 288, art. 111100. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111100

11. Isinkaralar K. A Study on the Gaseous Benzene Removal Based on Adsorption onto the Cost-Effective and Environmentally Friendly Adsorbent. *Molecules*, 2023, vol. 28(8), art. 3453. https://doi.org/10.3390/molecules28083453

12. Isinkaralar K. Improving the Adsorption Performance of Non-Polar Benzene Vapor by Using Lignin-Based Activated Carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 108706–108719. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30046-1

13. Kasatkin E.M., Akhmedova L.S., Markova E.B., Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Cherednichenko A.G. 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. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-110-124

14. Khoshakhlagh A.H., Yazdanirad S., Ducatman A. Climatic Conditions and Concentrations of BTEX Compounds in Atmospheric Media. *Environmental Research*, 2024, vol. 251, part 1, art. 118553. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118553

15. Kim M., Myung E., Kim H., Choi N., Cho K. Aqueous Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene (BTEX) Removal Using Core-Shell Structure Activated Carbon Ball as a Permeable Reactive Barrier Material. *Results in Engineering*, 2024, vol. 23, art. 102797. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102797

16. Lashaki M.J., Kamravaei S., Hashisho Z., Phillips J.H., Crompton D., Anderson J.E. et al. Adsorption and Desorption of a Mixture of Volatile Organic Compounds: Impact of Activated Carbon Porosity. *Separation and Purification Technology*, 2023, vol. 314, art. 123530. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123530

17. Li L., Zhang D., Hu W., Yang Y., Zhang S., Yuan R., et al. Improving VOC Control Strategies in Industrial Parks Based on Emission Behavior, Environmental Effects, and Health Risks: A Case Study through Atmospheric Measurement and Emission Inventory. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 865, art. 161235. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161235

18. Liu X., Zhu H., Wu W., Lin D., Yang K. Role of Molecular Size of Volatile Organic Compounds on Their Adsorption by KOH-Activated Micro-Mesoporous Carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 424, part B, art. 127355. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127355

19. Malyshkina E. Classification of the Sorbents Capable of Removing the Petroleum Products from Wastewater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 962, art. 042063. https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042063

20. Memetova A.E., Burakova I.V., Burakov A.E., Memetov N.R., Tkachev A.G. Effective Adsorption of Toluene and Benzene on Coconut Activated Carbon Modified with Carbon Nanotubes: Kinetics, Isotherms and Thermodynamics. *Adsorption*, 2023, vol. 29, pp. 335–349. https://doi.org/10.1007/s10450-023-00405-y

21. Muliani S., Zakir M., Fauziah S. Surface Modification of Activated Carbon Derived from Candlenut Shell (*Aleurites moluccana*) by HNO_3 and Its Application as an Adsorbent of Methyl Orange Dyes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 2023, vol. 66, no. 9, pp. 27–36. https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.149651.6476

22. Osman M.E., Dipheko T.D., Maximov V.V., Sheshko T.F., Markova E.B., Trusova E.A., et al. Higher Alcohols Synthesis from Syngas and Ethanol over $KCoMoS_2$ – Catalysts Supported on Graphene Nanosheets. *Chemical Engineering Communications*, 2023, vol. 210, iss. 9, pp. 1508–1527. https://doi.org/10.1080/00986445.2022.2116323

23. Pandey P., Yadav R. A Review on Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Fate and Distribution. *International Journal of Plant and Environment*, 2018, vol. 4, no. 02, pp. 14–26. https://doi.org/10.18811/ijpen.v4i02.2

24. Rehman A., Park M., Park S.J. Current Progress on the Surface Chemical Modification of Carbonaceous Materials. *Coatings*, 2019, vol. 9, iss. 2, art. 103. https://doi.org/10.3390/coatings9020103

25. Vialkova E., Korshikova E., Fugaeva A. Phytosorbents in Wastewater Treatment Technologies: Review. *Water*, 2024, vol. 16, no. 18, art. 2626. https://doi.org/10.3390/w16182626

26. Wanjala P.M., Opoku B.K., Ibisime E., Wafula E.N. Assessment of the Impact of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylene (BTEX) on Soil Microbial Population in Selected Areas of Port Harcourt City, Nigeria. *Scientific African*, 2025, vol. 27, art. e02525. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02525

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the manuscript