

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДсорбЦИИ ПАРОВ ТОЛУОЛА И БЕНЗОЛА АКТИВИРОВАННЫМИ УГЛЯМИ

С.Т. Тевельде¹

Е.Б. Маркова¹

В.С. Болдырев²

Ю.М. Аверина³

А.Г. Чередниченко¹

tkabotewelde@gmail.com

markova-eb@rudn.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

averinajm@mail.ru

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

Проведено сравнение эффективности адсорбции паров толуола и бензола при использовании активированных углей — КАУ, БАУ-А, АГ-3 (Российская Федерация) и Ecosorb (ФРГ). Определение адсорбционной емкости представленных сорбентов и изучение кинетики процесса адсорбции паров указанных растворителей выполнено при температуре 25 ± 1 °С и атмосферном давлении. Наибольшую адсорбционную емкость по отношению к толуолу и бензолу показал активированный уголь марки Ecosorb, затем угли марок АГ-3 и БАУ-А, наименьшую адсорбционную емкость — КАУ. Для паров бензола зарегистрирована более быстрая скорость адсорбции, которая определялась меньшим, чем у толуола, размером молекул и более высокой диффузионной способностью. Однако толуол продемонстрировал немного большую удельную адсорбционную емкость, чем бензол. Показано, что кинетика поглощения паров обоих растворителей наилучшим образом описывается уравнением псевдоторгового порядка для всех исследованных адсорбентов, что указывает на лимитирующий характер хемосорбции в общей схеме рассматриваемого процесса. Менее выраженная корреляция экспериментальных данных с уравнением Морриса — Вебера указывает на незначительное влияние диффузионных факторов на общую скорость адсорбции. Полученные результаты позволяют сделать выводы об общности механизма процесса адсорбции паров

Ключевые слова

Адсорбция, активированный уголь, летучие органические соединения, кинетика адсорбции, хемосорбция, экологические приложения

бензола и толуола использованными в исследовании адсорбентами, а также подчеркивают важность влияния физико-химических свойств адсорбатов и адсорбентов на характеристики адсорбции

Поступила 24.06.2025

Принята 08.09.2025

© Автор(ы), 2026

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

Введение. В настоящее время технологический прогресс и рост промышленного производства сопровождаются тревожным увеличением количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду. В мировом масштабе это заметно влияет на качество и условия жизни населения на планете [1]. Выбросы летучих органических соединений (ЛОС) в атмосферу занимают особое место в этом процессе. Они могут осуществляться как из природных биогенных (растения и животные), так и из антропогенных источников (транспорт, промышленные предприятия, сжигания отходов и др.). Именно ЛОС оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Они охватывают широкий спектр загрязняющих веществ с различными физическими, химическими и биологическими свойствами [2]. Так, бензол, толуол, этилбензол и изомеры ксилола (BTEX) являются наиболее распространенными ароматическими соединениями в атмосфере крупных городов и представляют собою большую группу ЛОС, которые являются предметом многочисленных токсикологических и медицинских исследований [3]. Воздействие этих соединений может быть при приеме пищи (питьевая вода, продукты питания), вдыхании загрязненного воздуха или в результате диффузии через кожу [4]. В то же время ароматические соединения имеют огромное значение в мировой экономике. Например, толуол является растворителем в красках, лаках, резине и смолах [5], а также присутствует в авиационном топливе и высокооктановых бензиновых смесях [6]. Ввиду высокой летучести и токсичности толуол может оставаться опасным загрязнителем воздуха и представлять значительный риск для здоровья человека и окружающей среды. Длительное воздействие повышенных концентраций паров толуола может привести к поражению нервной системы, печени и почек [7]. В свою очередь, бензол широко используют в производстве пластмасс, смол, синтетических волокон, смазочных материалов, красителей, моющих средств и других промышленных и бытовых товаров [3]. Бензол представляет собой широко распространенное загрязняющее вещество, поступающее из различных промышленных, бытовых и городских источников [8]. Бензол может достаточно быстро переходить из жидкого состояния в газообразное даже при пониженной

температуре, что увеличивает вероятность тяжелых поражений человеческого организма [9]. В 1987 г. Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицировало бензол как канцероген первой группы и установило предельные значения содержания в зоне рабочих помещений и окружающей атмосфере. Несмотря на это, заметная часть населения подвергается воздействию бензола в концентрациях, превышающих рекомендации ВОЗ [10]. Это может способствовать развитию лейкемии и других опасных для здоровья человека заболеваний [11]. Кроме того, ароматические соединения способствуют разрушению озонового слоя, образованию химического смога и опасных вторичных загрязнителей [12].

В настоящее время использование адсорбционных технологий признано наиболее эффективным методом борьбы с выбросами паров ЛОС в окружающую среду ввиду экономической эффективности, высокой степени очистки, технологической простоты и возможности многократного использования адсорбентов после их регенерации [8, 13]. Среди используемых адсорбентов активированные угли (АУ) выделяются как наиболее эффективные материалы для поглощения паров ЛОС [14, 15]. В зависимости от исходного материала их технические характеристики и технологии получения могут значительно различаться [16]. Несмотря на то, что общие закономерности процесса адсорбции ЛОС хорошо изучены, фактические характеристики различных АУ могут сильно отличаться, а возможности их практического применения для решения конкретных задач часто требуют дополнительного изучения [17].

Цель работы — исследовать и сравнительно оценить адсорбционную емкость нескольких АУ — КАУ, БАУ-А, АГ-3 и EcoSorb — паров толуола и бензола.

Материалы и методы. В качестве ЛОС использованы бензол (чистотой 99,96 %) и толуол (чистотой 99,00 %) производства компании «ХИММЕД» (Российская Федерация), в качестве адсорбентов — промышленные образцы АУмарок АГ-3, КАУ, ДАК-5 (ГОСТ 8703–74) и EcoSorb (GXВ, ФРГ). Кинетика адсорбции паров бензола и толуола на АУ исследована с использованием гравиметрического метода по методике, приведенной в [18]. Перед адсорбционными измерениями АУ нагревали в открытом контейнере при температуре 150 °С в течение 2 ч при атмосферном давлении для удаления воды и летучих примесей, а затем охлаждали до комнатной температуры. Для каждого эксперимента брали примерно 1,00 г высушенного АУ, который взвешивали в стеклянном бюксе с крышкой на аналитических весах. Затем образец помещали в эксикатор объемом 3,0 л, содержащий около 300 мл бензола или толуола. Через заданные промежутки времени эксика-

тор осторожно открывали, контейнер с пробой закрывали крышкой, а пробу взвешивали на аналитических весах для определения массы адсорбированного растворителя. Текущую удельную сорбционную емкость угольного сорбента определяли как $q_t = (m_t - m_0) / m_0$, где q_t — количество адсорбированного толуола или бензола в одном грамме активированного угля, г/г; m_0, m_t — масса адсорбента в начале эксперимента и в текущий момент времени t , г. Максимальное значение удельной сорбционной емкости материала измерено при отсутствии изменения массы сорбента в течение длительного промежутка времени. В результате проведенных исследований получены кинетические зависимости процесса адсорбции паров бензола и толуола различными угольными сорбентами. Полученные экспериментальные данные проанализированы с использованием уравнений [19] псевдопервого порядка Лагергрена

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

псевдвторого порядка Хо — Маккея

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

Еловича

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

и Морриса — Вебера

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

В (1)–(4) q_e — удельная адсорбционная емкость АУ в момент равновесия; k_1, k_2 — константы скорости адсорбции псевдопервого и псевдвторого порядка; α — начальная скорость адсорбции; β — постоянная десорбции; k — константа скорости диффузии уравнения Морриса — Вебера; C — постоянная сопротивления массопереносу в пограничном слое.

Результаты и их обсуждение. В процессе исследований изучены закономерности адсорбции паров толуола и бензола АУ марок КАУ, БАУ-А, АГ-3 и EcoSorb при температуре 25 °С. Соответствующие кинетические зависимости приведены на рис. 1. Результаты анализа показали, что все АУ демонстрируют высокую начальную скорость адсорбции паров толуола и бензола. Это свидетельствует о том, что в исходном состоянии центры адсорбции на поверхности АУ легкодоступны для молекул органического

растворителя, а сопротивление массопереносу практически отсутствует. С течением времени скорость адсорбции уменьшается по мере насыщения поверхности и уменьшения числа центров адсорбции. При адсорбции паров бензола и толуола АУ EcoSorb неизменно демонстрировал высокую эффективность, за ним следовал АУ АГ-3. Для БАУ-А кинетические закономерности адсорбции паров толуола и бензола заметно различались. Скорость фиксирования молекул толуола у БАУ-А имеет самые низкие значения. Однако БАУ-А продемонстрировал более высокую удельную адсорбционную емкость, чем КАУ, что хорошо коррелирует с разностью их показателей удельной емкости. Активированный уголь КАУ проявил высокую начальную скорость адсорбции паров использованных органических растворителей, но быстро вышел на режим насыщения, продемонстрировав наименьшую адсорбционную емкость из всех исследованных АУ.

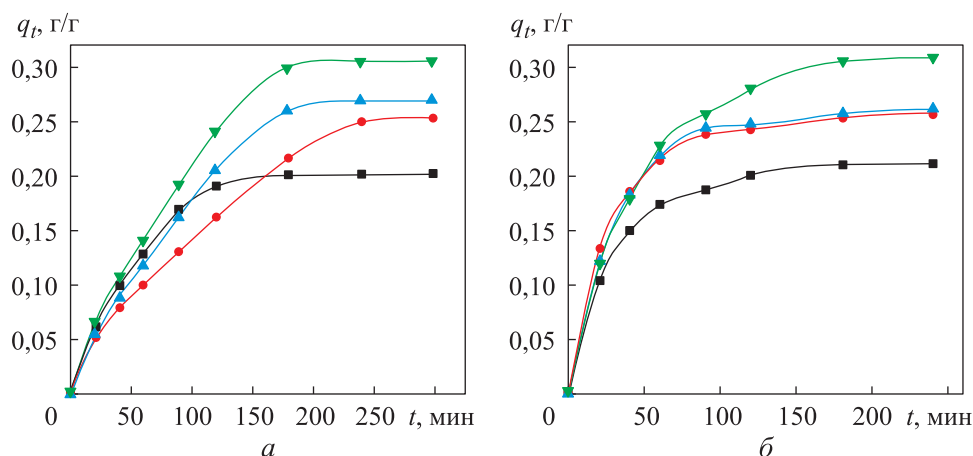


Рис. 1. Кинетика адсорбции паров толуола (а) и бензола (б) АУ КАУ (■), БАУ-А (●), АГ-3 (▲) и EcoSorb (▼) при температуре $25 \pm 1^\circ \text{C}$

Результаты сравнительного анализа кинетики адсорбции паров толуола и бензола показали, что структура и размер молекул адсорбата могут существенно влиять на особенности их взаимодействия с АУ [20]. Плоская молекула бензола, имеющая меньшие геометрические размеры, чем молекула толуола, и обладающая большей скоростью диффузии, продемонстрировала высокую начальную скорость адсорбции, быстро достигая максимальной удельной адсорбционной емкости, г/г, в течение короткого периода времени:

	КАУ	БАУ-А	АГ-3	EcoSorb
Толуол	0,2035	0,2780	0,2827	0,3253
Бензол	0,2197	0,2771	0,2817	0,3204

Такая быстрая кинетика предполагает, что активные центры адсорбции в поровой структуре легко доступны для молекул бензола, обеспечивая их быстрое поверхностное адсорбционное взаимодействие. Для молекул толуола, которые имеют несколько больший размер ввиду наличия метильной группы [21], наблюдается более медленная скорость адсорбции (рис. 2), что приводит к увеличению времени, необходимого для достижения адсорбционного равновесия [22]. Характерно, что значения удельной адсорбционной емкости отдельного сорбента мало отличаются для толуола и бензола, но зависят от свойств поглощающего материала [16].

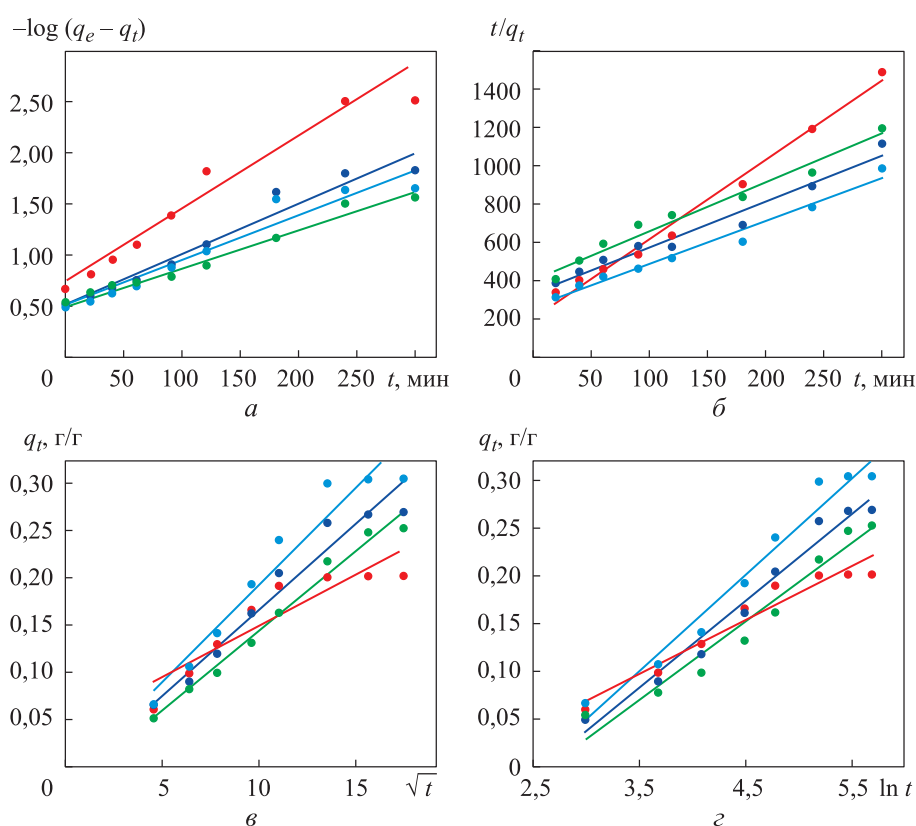


Рис. 2. Результаты обработки кинетических экспериментов адсорбции паров толуола АУ КАУ (•), БАУ-А (•), АГ-3 (•) и EcoSorb (•) в координатах уравнений (1) (а), (2) (б), (3) (в) и (4) (г):

$$\begin{aligned}
 &\text{КАУ: } y = 0,0071x + 0,7831 \text{ (а)}, y = 4,1190x + 205,1600 \text{ (б)}, y = 0,0109x - 0,0395 \text{ (в)}, \\
 &y = 0,0563x - 0,1007 \text{ (г)}; \text{БАУ-А: } y = 0,0037x + 0,5413 \text{ (а)}, y = 2,5039x + 410,5700 \text{ (б)}, \\
 &y = 0,0171x - 0,0276 \text{ (в)}, y = 0,0820x - 0,2187 \text{ (г)}; \text{АГ-3 } y = 0,0050x + 0,5339 \text{ (а)}, \\
 &y = 2,3855x + 337,2000 \text{ (б)}, y = 0,0186x - 0,0206 \text{ (в)}, y = 0,0916x - 0,2395 \text{ (г)}; \\
 &\text{EcoSorb: } y = 0,0046x + 0,5055 \text{ (а)}, y = 2,2252x + 265,8000 \text{ (б)}, y = 0,0205x - 0,0125 \text{ (в)}, \\
 &y = 0,1013x - 0,2553 \text{ (г)}
 \end{aligned}$$

Отмеченная в исследованиях высокая эффективность образцов АУ EcoSorb при поглощении паров обоих растворителей, свидетельствует об оптимальном состоянии его поверхностных свойств для эффективной адсорбции ароматических углеводородов. Выявленные кинетические закономерности имеют значение для проектирования систем очистки воздуха от конкретных ЛОС с учетом размера их молекул и пористой архитектуры адсорбента.

Для выяснения особенностей адсорбции паров бензола и толуола различными марками АУ полученные результаты кинетического эксперимента обработаны с использованием уравнений (1)–(4). Адсорбция молекул толуола на АУ КАУ, БАУ-А, АГ-3 и EcoSorb лучше всего описывается кинетическим уравнением (2), указывающим на лимитирующий характер стадии хемосорбции в изучаемом процессе (табл. 1). Уравнение (3), которое учитывает неоднородность адсорбционной поверхности и хемосорбцию как поверхностное взаимодействие молекул адсорбата с конкретным энергетическим центром на поверхности адсорбента, также хорошо подходит для описания полученных экспериментальных данных. Уравнение (4), учитывающее влияние диффузионных факторов на адсорбцию, показало менее достоверный результат при описании полученных экспериментальных результатов.

Таблица 1

Константы кинетических уравнений (1)–(4) для адсорбции паров толуола

Кинетический параметр	КАУ	БАУ-А	АГ-3	EcoSorb
<i>Эксперимент</i>				
q_e , г/г	0,2035	0,2780	0,2827	0,3253
<i>Уравнение (1)</i>				
k_1 , мин ⁻¹	0,0164	0,0085	0,0115	0,0124
q_e , г/г	0,1648	0,2875	0,2925	0,3537
R^2	0,9264	0,9832	0,9610	0,9737
<i>Уравнение (2)</i>				
k_2 , г/(г · мин)	0,0827	0,0153	0,0169	0,0186
q_e , г/г	0,2428	0,3994	0,4192	0,4494
R^2	0,9884	0,9686	0,9699	0,9732

Кинетический параметр	КАУ	БАУ-А	АГ-3	EcoSorb
<i>Уравнение (3)</i>				
α , г/(г · мин)	0,0080	0,0057	0,0067	0,0081
β , г/г	14,6199	12,1951	10,9170	9,8717
R^2	0,9835	0,9555	0,9705	0,9664
<i>Уравнение (4)</i>				
k	0,0164	0,0171	0,0186	0,0205
C	– 0,0029	– 0,0276	– 0,0206	– 0,0125
R^2	0,9472	0,9846	0,9462	0,9364

Переход от адсорбции паров толуола к парам бензола подтвердил, что установленные кинетические закономерности процесса практически не изменяются. Это свидетельствует о том, что имеющиеся различия свойств использованных органических растворителей мало отражаются на механизме адсорбции.

Результаты обработки экспериментальных данных с использованием уравнений (1)–(4) приведены на рис. 3. Все экспериментальные данные по адсорбции паров бензола хорошо описываются кинетическим уравнением (2), особенно для EcoSorb и БАУ-А (табл. 2). Это подтверждает лимитирующий характер стадии хемосорбции в изучаемом процессе адсорбции паров бензола. Некоторое увеличение адсорбционной емкости (q_e) АУ при адсорбции молекул толуола может быть объяснено разностью молекулярных весов использованных адсорбатов. При идентичности механизмов и фиксированном числе поверхностных центров адсорбции массовые различия адсорбатов должны давать наблюдаемые отличия. Как и в предыдущем случае, использование уравнения (3) также дает хорошие результаты при обработке экспериментальных данных по адсорбции паров бензола.

Применение уравнения (4) для описания экспериментальных данных закономерно показало более низкий результат, что подтверждает незначительный вклад диффузионных процессов в динамику адсорбции паров бензола и толуола АУ.

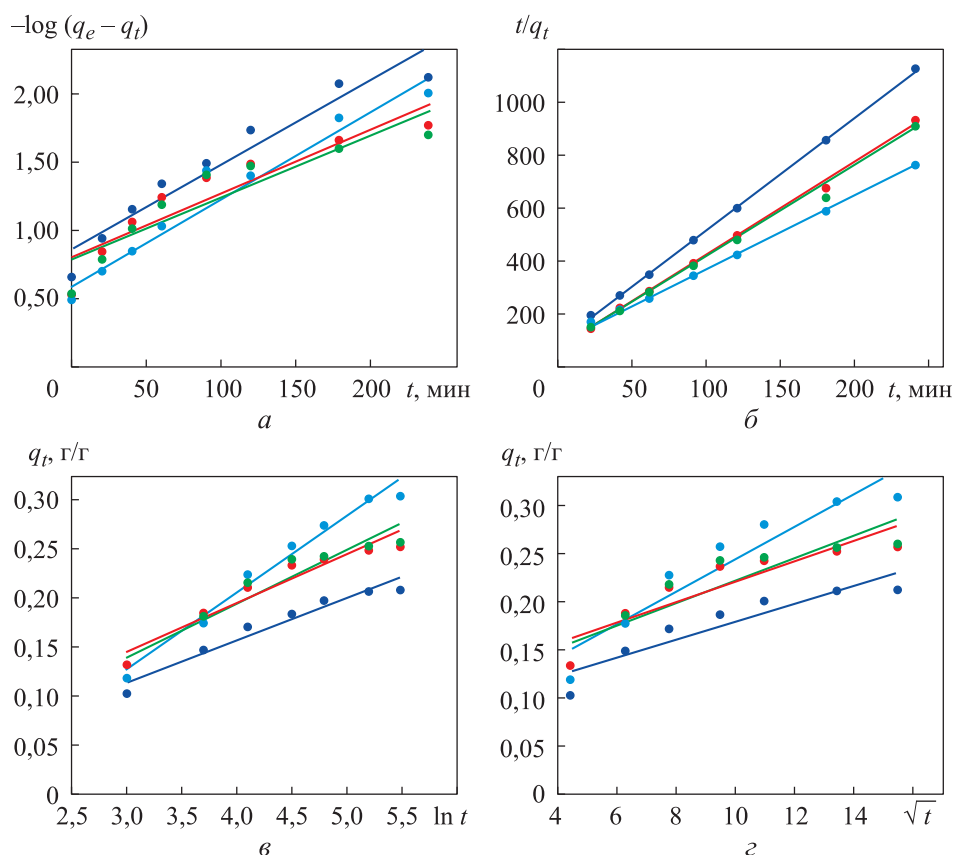


Рис. 3. Результаты обработки кинетических экспериментов адсорбции паров бензола АУ КАУ (•), БАУ-А (•), АГ-3 (•) и EcoSorb (•) в координатах уравнений (1) (а), (2) (б), (3) (в) и (4) (г):

КАУ: $y = 0,0061x + 0,8634$ (а), $y = 4,2541x + 96,8510$ (б), $y = 0,0441x - 0,0170$ (в),
 $y = 0,0092x + 0,0872$ (г); БАУ-А: $y = 0,0037x + 0,5413$ (а), $y = 2,5039x + 410,5700$ (б),
 $y = 0,0171x - 0,0276$ (в), $y = 0,0820x + 0,2187$ (г); АГ-3: $y = 0,0046x + 0,8084$ (а),
 $y = 3,5387x + 70,4260$ (б), $y = 0,0506x - 0,0036$ (в), $y = 0,0105x + 0,1164$ (г);
 EcoSorb: $y = 0,0063x + 0,5928$ (а), $y = 2,7375x + 105,9200$ (б), $y = 0,0797x - 0,1098$ (в),
 $y = 0,0170x + 0,0755$ (г)

Таблица 2

Константы кинетических уравнений (1)–(4) для адсорбции паров бензола

Кинетический параметр	КАУ	БАУ-А	АГ-3	EcoSorb
<i>Эксперимент</i>				
q_e , г/г	0,2197	0,2771	0,2817	0,3204
<i>Уравнение (1)</i>				
k_1 , мин ⁻¹	0,0143	0,0106	0,0104	0,0150

Кинетический параметр	КАУ	БАУ-А	АГ-3	EcoSorb
<i>Уравнение (1)</i>				
q_e , г/г	0,1366	0,1555	0,1600	0,2544
R^2	0,9326	0,8650	0,8387	0,974
<i>Уравнение (2)</i>				
k_2 , г/(г · мин)	0,1864	0,1778	0,1578	0,0702
q_e , г/г	0,2355	0,2826	0,2886	0,3673
R^2	0,9991	0,9994	0,9977	0,9979
<i>Уравнение (3)</i>				
α , г/(г · мин)	0,0219	0,0469	0,0343	0,0203
β , г/г	19,6078	19,7628	17,8571	12,3762
R^2	0,9808	0,9326	0,9047	0,9767
<i>Уравнение (4)</i>				
k	0,0127	0,0171	0,0197	0,0205
C	0,0616	0,0696	0,0492	0,0489
R^2	0,9224	0,9224	0,9053	0,9482

Заключение. Результаты экспериментального исследования подтвердили, что испытанные образцы промышленных АУ могут адсорбировать пары толуола и бензола с разной эффективностью. Среди исследованных материалов сорбент EcoSorb продемонстрировал высокую адсорбционную емкость по отношению к парам обоих растворителей. Для отдельного образца каждого АУ установлено более высокое значение удельной адсорбционной емкости по парам толуола, чем по парам бензола, что объясняется большим молекулярным весом толуола. При этом в результате структурных особенностей скорость адсорбции молекул бензола оказалась несколько выше, чем скорость связывания молекул толуола. Во всех случаях кинетика адсорбции паров бензола и толуола прекрасно описывается уравнением (2), что свидетельствует о лимитирующем характере хемосорбции молекул органического растворителя на активных центрах адсорбента. Этот вывод также подтверждается хорошим совпадением экспериментальных и расчетных значений при использовании уравнения (3). Меньшее соответствие получено в случае применения уравнения (4), учитывающего влияние диффузионных факторов на адсорбцию. Следует

отметить, что АУ АГ-3 и БАУ-А также показали высокую эффективность при адсорбции паров использованных ароматических растворителей и могут быть рекомендованы для промышленного применения в адсорбционных технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chin W., Huang C., Chen Y., et al. BTEX exposure and metabolite levels in Taiwan schoolchildren near petrochemical areas. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 2025, vol. 266, art. 114545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2025.114545>
- [2] Batur E., Kutluay S. Dynamic adsorption behavior of benzene, toluene, and xylene VOCs in single- and multi-component systems by activated carbon derived from defatted black cumin (*Nigella sativa* L.) biowaste. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2022, vol. 10, no. 3, art. 107565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107565>
- [3] Liu L., Ahmadi Y., Kim K.-H., et al. The relative dominance of surface oxygen content over pore properties in controlling adsorption and retrograde behavior of gaseous toluene over microporous carbon. *Sci. Total Environ.*, 2024, vol. 906, art. 167308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167308>
- [4] Feo M.L., Frattoni M., Paoloacci E., et al. Assessing the efficiency of zeolites in BTEX adsorption: impact of pore structure and humidity in single and multicomponent systems. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 2025, vol. 384, art. 113462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113462>
- [5] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. М., Пэйнт-Медиа, 2021.
- [6] Shojaei A., Rostami R. BTEX concentration and health risk assessment in automobile workshops. *Atmos. Pollut. Res.*, 2024, vol. 15, no. 12, art. 102306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102306>
- [7] Khoshakhlagh A.H., Yazdanirad S., Ducatman A. Climatic conditions and concentrations of BTEX compounds in atmospheric media. *Environ. Res.*, 2024, vol. 251-1, art. 118553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118553>
- [8] Wanjala P.M., Opoku B.K., Ibisime E., et al. Assessment of the impact of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) on soil microbial population in selected areas of Port Harcourt City, Nigeria. *Sci. Afr.*, 2025, vol. 27, art. e02525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02525>
- [9] Kim M., Myung E., Kim H., et al. Aqueous benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) removal using core-shell structure activated carbon ball as a permeable reactive barrier material. *Results Eng.*, 2024, vol. 23, art. 102797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102797>
- [10] Ghasemi R., Saranjam B., Zarei A., et al. Assessment of health risks of university professors through exposure to BTEX compounds from white board markers. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, art. 8435. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92336-7>

- [11] Baberi Z., Azhdarpoor A., Hoseini M., et al. Monitoring benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) levels in mixed-use residential-commercial buildings in Shiraz, Iran: assessing the carcinogenicity and non-carcinogenicity risk of their inhabitants. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 2, art. 723. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19020723>
- [12] Memetova A. E., Irina V., Burakova I.V., et al. Effective adsorption of toluene and benzene on coconut activated carbon modified with carbon nanotubes: kinetics, isotherms and thermodynamics. *Adsorption*, 2023, vol. 29, no. 5-6, pp. 335–349. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00405-y>
- [13] Jayaraj S., Shiva Nagendra S.M. An assessment of atmospheric concentrations and spatiotemporal variation of BTEX and associated pollutants in India. *J. Environ. Sci.*, 2025, vol. 150, pp. 230–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.004>
- [14] Awada A. M., Shaikha S.M.R., Jalaba R., et al. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. *Sep. Purif. Technol.*, 2019, vol. 228, art. 115719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>
- [15] Dipheko T.D., Maximov V.V., Permyakov E.A., et al. Ethanol dehydrogenation over (K)(Co)MoS₂ catalysts supported on activated carbon: effect of active phase composition. *S. Afr. J. Chem. Eng.*, 2022, vol. 42, pp. 290–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.004>
- [16] Cao J., Li Y., Ma X., et al. Constructing binuclear sites to modulate the charge distribution of MIL-101 for enhanced toluene adsorption performance: experimental and theoretical studies. *Sep. Purif. Technol.*, 2025, vol. 354-7, art. 129400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129400>
- [17] Fu Y., Zhang P., Wang X. Feasible defect and hydrophobic modification of MIL-100(Cr) for efficient toluene removal from air. *Chem. Eng. J.*, 2024, vol. 482, art. 149163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149163>
- [18] Касаткин Е.М., Ахмедова Л.С., Маркова Е.Б. и др. Изучение процесса адсорбции паров бензола активированными углями марок АР-А, АР-Б 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>
- [19] Guo X., Wang J. A general kinetic model for adsorption: theoretical analysis and modeling. *J. Mol. Liq.*, 2019, vol. 288, art. 111100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111100>
- [20] Wu M., Zhao Z., Cai G., et al. Adsorption behaviour and mechanism of benzene, toluene and *m*-xylene (BTX) solution onto kaolinite: experimental and molecular dynamics simulation studies. *Sep. Purif. Technol.*, 2022, vol. 291, art. 120940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120940>
- [21] Asenjo N.G., Álvarez P., Granda M., et al. High performance activated carbon for benzene/toluene adsorption from industrial wastewater. *J. Hazard. Mater.*, 2011, vol. 192, no. 3, pp. 1525–1532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.072>

[22] Ncube T., Reddy K.S.K., Al Shoaibi A., et al. Benzene, toluene, *m*-xylene adsorption on silica-based adsorbents. *Energy Fuels*, 2017, vol. 31, no. 2, pp. 1882–1888.

DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03192>

Тевельде Сахле Ткабо — аспирант кафедры физической и коллоидной химии РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Маркова Екатерина Борисовна — канд. хим. наук, доцент кафедры физической и коллоидной химии РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий научный сотрудник лаборатории «Порошковые материалы и наноматериалы» Центра НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Аверина Юлия Михайловна — канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Чередниченко Александр Генрихович — д-р хим. наук, заведующий кафедрой физической и коллоидной химии РУДН (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тевельде С.Т., Маркова Е.Б., Болдырев В.С. и др. Исследование эффективности адсорбции паров толуола и бензола активированными углями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 2 (125), с. 94–110.

EDN: VUUZNE

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF TOLUENE AND BENZENE
VAPOR ADSORPTION BY ACTIVATED CARBONS**

S.T. Tewelde¹

E.B. Markova¹

V.S. Boldyrev²

Yu.M. Averina³

A.G. Cherednichenko¹

tkabotewelde@gmail.com

markova-eb@rudn.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

averinajm@mail.ru

cherednichenko-ag@rudn.ru

¹ RUDN University, Moscow, Russian Federation

² BMSTU, Moscow, Russian Federation

³ Mendeleev University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article compares the efficiency of toluene and benzene vapor adsorption using activated carbons such as KAU, BAU-A, AG-3 (Russian Federation), and Eco-Sorb (Germany). The adsorption capacity of these sorbents is determined, and the kinetics of vapor adsorption of these solvents is studied at a temperature of 25 ± 1 °C and atmospheric pressure. The highest adsorption capacity for toluene and benzene was shown by EcoSorb activated carbon, followed by AG-3 and BAU-A activated carbons, and the lowest adsorption capacity was shown by KAU activated carbon. For benzene vapors, a faster adsorption rate was observed, which was determined by the smaller size of the molecules compared to toluene and the higher diffusion capacity. However, toluene demonstrated a slightly higher specific adsorption capacity than benzene. It is shown that the kinetics of vapor absorption of both solvents is best described by a pseudo-second-order equation for all the studied adsorbents, which indicates the limiting nature of chemisorption in the overall scheme of the process under consideration. The less pronounced correlation of the experimental data with the Morris — Weber equation indicates a minor influence of diffusion factors on the overall adsorption rate. The obtained results allow us to draw conclusions about the commonality of the mechanism of adsorption of benzene and toluene vapors by the adsorbents used in the study, and also emphasize the importance of the influence of the physical and chemical properties of the adsorbates and adsorbents on the technical characteristics of adsorption

Keywords

Adsorption, activated carbon, volatile organic compounds, adsorption kinetics, chemisorption, environmental applications

Received 24.06.2025

Accepted 08.09.2025

© Author(s), 2026

The work was supported by the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program

REFERENCES

- [1] Chin W., Huang C., Chen Y., et al. BTEX exposure and metabolite levels in Taiwan schoolchildren near petrochemical areas. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 2025, vol. 266, art. 114545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2025.114545>
- [2] Batur E., Kutluay S. Dynamic adsorption behavior of benzene, toluene, and xylene VOCs in single- and multi-component systems by activated carbon derived from defatted black cumin (*Nigella sativa* L.) biowaste. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2022, vol. 10, no. 3, art. 107565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107565>

- [3] Liu L., Ahmadi Y., Kim K.-H., et al. The relative dominance of surface oxygen content over pore properties in controlling adsorption and retrograde behavior of gaseous toluene over microporous carbon. *Sci. Total Environ.*, 2024, vol. 906, art. 167308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167308>
- [4] Feo M.L., Frattoni M., Paoloacci E., et al. Assessing the efficiency of zeolites in BTEX adsorption: impact of pore structure and humidity in single and multicomponent systems. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 2025, vol. 384, art. 113462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113462>
- [5] Boldyrev V.S., Kuznetsov S.V., Menshikov V.V. Innovatsionnoe razvitie maloton-nazhnykh nauchno-proizvodstvennykh predpriyatiy lakokrasochnoy otrasli [Innovative development of small-tonnage scientific and production enterprises of paint and coating industry]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2021.
- [6] Shojaei A., Rostami R. BTEX concentration and health risk assessment in automobile workshops. *Atmos. Pollut. Res.*, 2024, vol. 15, no. 12, art. 102306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102306>
- [7] Khoshakhlagh A.H., Yazdanirad S., Ducatman A. Climatic conditions and concentrations of BTEX compounds in atmospheric media. *Environ. Res.*, 2024, vol. 251-1, art. 118553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118553>
- [8] Wanjala P.M., Opoku B.K., Ibisime E., et al. Assessment of the impact of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) on soil microbial population in selected areas of Port Harcourt City, Nigeria. *Sci. Afr.*, 2025, vol. 27, art. e02525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02525>
- [9] Kim M., Myung E., Kim H., et al. Aqueous benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) removal using core-shell structure activated carbon ball as a permeable reactive barrier material. *Results Eng.*, 2024, vol. 23, art. 102797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102797>
- [10] Ghasemi R., Saranjam B., Zarei A., et al. Assessment of health risks of university professors through exposure to BTEX compounds from white board markers. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, art. 8435. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92336-7>
- [11] Baberi Z., Azhdarpoor A., Hoseini M., et al. Monitoring benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) levels in mixed-use residential-commercial buildings in Shiraz, Iran: assessing the carcinogenicity and non-carcinogenicity risk of their inhabitants. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 2, art. 723. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19020723>
- [12] Memetova A. E., Irina V., Burakova I.V., et al. Effective adsorption of toluene and benzene on coconut activated carbon modified with carbon nanotubes: kinetics, isotherms and thermodynamics. *Adsorption*, 2023, vol. 29, no. 5-6, pp. 335–349. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00405-y>
- [13] Jayaraj S., Shiva Nagendra S.M. An assessment of atmospheric concentrations and spatiotemporal variation of BTEX and associated pollutants in India. *J. Environ. Sci.*, 2025, vol. 150, pp. 230–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.004>

- [14] Awada A. M., Shaikha S.M.R., Jalaba R., et al. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. *Sep. Purif. Technol.*, 2019, vol. 228, art. 115719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>
- [15] Dipheko T.D., Maximov V.V., Permyakov E.A., et al. Ethanol dehydrogenation over (K)(Co)MoS₂ catalysts supported on activated carbon: effect of active phase composition. *S. Afr. J. Chem. Eng.*, 2022, vol. 42, pp. 290–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.004>
- [16] Cao J., Li Y., Ma X., et al. Constructing binuclear sites to modulate the charge distribution of MIL-101 for enhanced toluene adsorption performance: experimental and theoretical studies. *Sep. Purif. Technol.*, 2025, vol. 354-7, art. 129400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129400>
- [17] Fu Y., Zhang P., Wang X. Feasible defect and hydrophobic modification of MIL-100(Cr) for efficient toluene removal from air. *Chem. Eng. J.*, 2024, vol. 482, art. 149163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149163>
- [18] 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*, no. 4, pp. 110–124 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-110-124>
- [19] Guo X., Wang J. A general kinetic model for adsorption: theoretical analysis and modeling. *J. Mol. Liq.*, 2019, vol. 288, art. 111100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111100>
- [20] Wu M., Zhao Z., Cai G., et al. Adsorption behaviour and mechanism of benzene, toluene and *m*-xylene (BTX) solution onto kaolinite: experimental and molecular dynamics simulation studies. *Sep. Purif. Technol.*, 2022, vol. 291, art. 120940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120940>
- [21] Asenjo N.G., Álvarez P., Granda M., et al. High performance activated carbon for benzene/toluene adsorption from industrial wastewater. *J. Hazard. Mater.*, 2011, vol. 192, no. 3, pp. 1525–1532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.072>
- [22] Ncube T., Reddy K.S.K., Al Shoaibi A., et al. Benzene, toluene, *m*-xylene adsorption on silica-based adsorbents. *Energy Fuels*, 2017, vol. 31, no. 2, pp. 1882–1888. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03192>

Tewelde T.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, BMSTU, Leading Researcher, Powder Materials and Nanomaterials Laboratory of the Digital Materials Science Center: New Materials and Substances, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Averina Yu.M. — Cand. Sc. (Chem.), Head of the Department of Logistics and Economic Informatics, Mendeleeev University (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:

Tewelde T.S., Markova E.B., Boldyrev V.S., et al. Study of the efficiency of toluene and benzene vapor adsorption by activated carbons. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 2 (125), pp. 94–110 (in Russ.). EDN: VUUZNE