

Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы

Самех Абдельфаттах Араби Ахмед^{1,2}, Елена Сергеевна Гогина^{3,4},
Николай Алексеевич Макиша²

¹ Асуанский университет, г. Асуан, Египет;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); г. Москва, Россия;

⁴ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Фенолы являются одним из основных органических компонентов, присутствующих в стоках многих промышленных предприятий. Удаление фенола из сточных вод, содержащих фенол, — приоритетная задача из-за его высокой токсичности для людей и животных даже при низкой концентрации. Адсорбция на основе активированного угля (АУ) — один из передовых процессов очистки, широко используется для очистки водных загрязнителей. Цель исследования — изучение адсорбции фенола на активированном угле на основе ветвей финиковой пальмы (ВФП-АУ) в качестве низкокзатратного адсорбента.

Материалы и методы. В качестве сырья для получения АУ методом химической активации H_3PO_4 использовались ВФП. Эксперименты по адсорбции проводились в партиях. Также исследованы кинетика и изотермы адсорбции.

Результаты. ВФП-АУ получен химической активацией ветвей финиковой пальмы с использованием H_3PO_4 (600 °C, 60 мин), образец был обозначен ВФП-АУ- H_3PO_4 . Результаты показали выход АУ в размере 52,7 %. Максимальная эффективность адсорбции фенола была достигнута при pH = 7. Адсорбция фенола хорошо описывалась кинетикой псевдотортого порядка с K_2 , г/(мг·мин). Модель изотермы адсорбции фенола следовала модели Ленгмюра, где R^2 было 0,9215 и $K_L = 0,0161$ л/мг при 180 мин времени равновесия. Максимальная емкость адсорбции фенола составляла 77,52 мг/г (мг фенола, поглощенного/г ВФП-АУ- H_3PO_4), что является высоким значением по сравнению со многими другими результатами, представленными в литературе.

Выводы. Результаты свидетельствуют о том, что АУ, полученный из ветвей финиковой пальмы, может быть перспективным материалом для очистки сточных вод, а также эффективным средством для решения проблем экологического загрязнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фенол, адсорбция, активированный уголь, ветви финиковой пальмы, кинетика, изотерма адсорбции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ахмед С.А.А., Гогина Е.С., Макиша Н.А. Адсорбция фенола на активированном угле, полученном из ветвей финиковой пальмы // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 426–435. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.426-435

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Макиша, makishana@mgsu.ru.

Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches

Ahmed Sameh^{1,2}, Elena S. Gogina^{3,4}, Nikolay A. Makisha²

¹ Aswan University; Aswan, Egypt;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

³ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI); Moscow, Russian Federation;

⁴ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Phenols are one of the main organic components present in the effluents of many industrial enterprises. However, the discharge of wastewater containing phenol is a priority due to its high toxicity to humans and animals, even at

low concentrations. Activated carbon (AC) adsorption, which is one of the advanced purification processes, is widely used to purify water pollutants and the production of activated carbon from several carbon by-products of agriculture was also reported. In this regard, the purpose of this research was to study the adsorption of phenol on activated carbon based on date palm branches (DPB-AC) as a low-cost adsorbent.

Materials and methods. DPB was used as a raw material for the production of AC by chemical activation of H_3PO_4 . Adsorption experiments were carried out in batches. The kinetics and isotherms of adsorption were also investigated.

Results. DPB-AC was obtained by chemical activation of date palm branches using H_3PO_4 (600 °C, 60 min), and the specimen was designated as (DPB-AC- H_3PO_4). The results showed an AC yield of 52.7 %. The maximum efficiency of phenol adsorption was achieved at pH 7. In addition, phenol adsorption was well described by the kinetics of the pseudo second order with $K_2 = 0.0503 \text{ g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$. The phenol adsorption isotherm model followed the Langmuir model, where R^2 was 0.9215 and $K_L = 0.0161 \text{ l}/\text{mg}$ at 180-equilibrium time. The maximum adsorption capacity of phenol was 77.52 mg/g (mg of phenol absorbed/g of DPB-AC- H_3PO_4), which is a high value compared to many other results presented in the literature.

Conclusions. In general, the results indicate that AC obtained from date palm branches can be a promising material for wastewater treatment, as well as an effective means to solve environmental pollution problems.

KEYWORDS: Phenol, Adsorption, Activated carbon, Date palm branches, Kinetics, Adsorption isotherm

FOR CITATION: Ahmed Sameh, Gogina E.S., Makisha N.A. Adsorption of phenol on activated carbon obtained from date palm branches. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):426-435. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.426-435 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Makisha, makishana@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время удалению фенола уделяется все большее внимание. Источниками фенола являются выбросы химической промышленности от газификации угля, производства полимерных смол, нефтепереработки, коксохимических заводов, бумажных комбинатов, производства гербицидов и фунгицидов. Актуально удаление фенольных соединений, которые служат одними из главных загрязнителей окружающей среды. Фенольные соединения формируются не только в результате деятельности человека, но и естественным образом [1].

Фенолы более устойчивы, чем спирты, реагируют с основаниями, такими как гидроксид натрия, образуя ионы феноксида. Они более слабые кислоты, чем карбоксильные кислоты, и не реагируют с гидрокарбонатом натрия. Чистый фенол — ароматический углеводород, производный от бензола с химической формулой C_6H_5OH . Представляет собой белое кристаллическое твердое вещество с запахом дезинфицирующего средства, хорошо растворяется в воде при комнатной температуре [2].

Однако фенол рассматривается как приоритетный загрязнитель с высокой токсичностью даже при низких концентрациях. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) установило предельное значение фенола в воде для обеспечения здоровья человека на уровне 0,5 мг/л для предотвращения возможных вредных последствий при употреблении воды или загрязненных растений и продуктов животноводства [3]. Согласно законодательству Российской Федерации, максимально допустимая концентрация фенола в воде водных объектов составляет 0,001 мг/л¹.

¹ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552.

Деструктивные воздействия фенола на организм человека хорошо задокументированы. При попадании фенола в организм через систему пищеварения происходит повреждение слизистой оболочки полости рта, пищевода и желудочно-кишечного тракта, требующее немедленной медицинской помощи. При длительном или повторном воздействии вещество впитывается через кожу и слизистые оболочки, потенциально влияя на печень, почки, глаза и центральную нервную систему [4, 5]. Ввиду высокой токсичности фенольных соединений обработка органических сточных вод (СВ) оказывает важное воздействие на жизнь человека. Фенол может быть эффективно удален с использованием традиционных методов, таких как экстракция, дистилляция, химическое окисление, электрохимическое окисление и адсорбция. Активированный уголь (АУ) — наиболее широко используется в промышленности как адсорбент. Он эффективен для удаления следов органических соединений. Активированный уголь — аморфный углеродный материал, который проявляет отличную эффективность в процессе адсорбции, прежде всего благодаря большой поверхности и высокой пористости [6]. Поиск новых предшественников в производстве активированного угля также изучается как экономическая альтернатива. Агропромышленные отходы выделяются как перспективные предшественники благодаря своей доступности, значительной механической прочности и низкому содержанию золы с высоким содержанием углерода. Проведены исследования процесса адсорбции с использованием АУ, полученного из отходов, таких как скорлупа пекана, кора дуба, апельсиновая кожура, скорлупа кокоса и семена оливы. Их получают из различных предшественников методами физической или химической активации. Один из часто применяемых методов химической активации — термолиз углеродсодержащего предшественника в присутствии фосфорной кислоты (H_3PO_4).

Финиковые пальмы широко распространены в Египте, насчитывается 15 млн финиковых пальм.

Каждый год перерабатывается 100 000 т ветвей финиковых пальм (ВФП) в качестве сельскохозяйственных отходов. Одним из преимуществ биомассы, производимой из сельскохозяйственных побочных продуктов, является низкое содержание золы с высоким содержанием углерода. Отходы сельского хозяйства, такие как ВФП, могут быть преобразованы в активированный уголь и использованы для очистки загрязненных органическими соединениями СВ. Применение активированного угля на основе ветвей финиковой пальмы (ВФП-АУ) для данной цели не было исследовано до настоящего времени.

Цель исследования — изучение эффективности ВФП-АУ для очистки СВ, содержащих фенол. Рассмотрен процесс получения ВФП-АУ с помощью химического метода активации с применением H_3PO_4 . Разработаны модели кинетики адсорбции фенола и изотермы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Применяемые в исследовании химические реагенты были аналитической чистоты и использовались без дополнительной очистки. Все растворы приготовлены на дистиллированной воде, если не указано иное. Использовались различные реагенты, такие как фенол, NaOH (все производства «Химмед», Россия). Фосфорная кислота (H_3PO_4) 87 % приобретена в компании «Химкрафт», Россия. Для аналитического метода использовали 4-аминоантипирин («Диаэм», Россия), $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, KH_2PO_4 и $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (все производства «Химкрафт», Россия).

Приготовление активированного угля из ветвей финиковой пальмы

Ветви финиковой пальмы (полученные из г. Асуан, Египет) как сырье измельчали на очень мелкие части, несколько раз промывали дистиллированной водой. Необработанные ветки сушили при температуре 105 °С в течение 24 ч в сушильном шкафу (Binder FD 53, Германия). Высушенные ветки финиковой пальмы были помечены как «ВФП». ВФП активирован методом химической активации с использованием активатора H_3PO_4 . Что касается импрегнации H_3PO_4 , 10 г сушеного ВФП смешивались с 20 мл 60 %-ного H_3PO_4 в течение 12 ч при комнатной температуре. Получившуюся смесь помещали в сушильную печь шкафа при температуре 105 °С на 12 ч для удаления влаги.

На следующем этапе образцы из H_3PO_4 /ВФП наливали в фарфоровые чашки, накрывали крышками, упаковывали в стальные трубы длиной 10 см, каждая из которых имела толщину около 2 мм, диаметр 50 мм и один узкий порт диаметром 8 мм в верхнем конце для выпуска газов. Трубы помещали в муфельную печь (SNOL 7,2/1100), которая медленно нагревалась со скоростью 10 °С/мин до достижения целевой температуры 600 °С. Затем трубы извлекали из печи

через 60 мин. Полученные образцы АУ охлаждали и подвергали повторным циклам промывки дистиллированной водой до pH = 7. ВФП-АУ помещали в фарфоровую посуду и сушили при температуре 105 °С в течение 24 ч в сушильном шкафу. Полученные образцы активированного угля маркировались как ВФП-АУ- H_3PO_4 и хранились для последующего анализа и экспериментов по адсорбции.

Эксперименты по периодической адсорбции

Выход при производстве активированного угля $Y_{\text{АУ}}$ определяется отношением массы пропитанного сырья (ВФП) к конечной массе АУ, полученной после промывки и сушки. Математически этот выход также может быть выражен уравнением:

$$Y_{\text{АУ}} = \frac{\text{Вес активированного угля}}{\text{Вес сырья (ВФП)}} \% \quad (1)$$

Проведены эксперименты с целью получения наилучшего образца АУ, полученного в результате активации ВФП. К 150 мг образцов АУ добавляли 50 мл раствора фенола с концентрацией 100 мг/дм³. Для получения оптимальных условий pH растворов регулировали до необходимого значения (в пределах от 3 до 11) с применением растворов 0,1 NaOH или 0,1 HCl. После этого к растворам фенола добавляли 150 мг ВФП-АУ- H_3PO_4 . Смеси непрерывно перемешивали в течение 240 мин для достижения равновесия при комнатной температуре с помощью установки с магнитной мешалкой. Затем каждый образец фильтровали с использованием фильтровальной бумаги с порами 0,2 мкм и подвергали анализу остаточных концентраций фенола.

Эксперименты по кинетике адсорбции фенола выполнялись в серии экспериментов с 50 мл растворов фенола с концентрацией 100 мг/дм³ и 150 мг ВФП-АУ- H_3PO_4 при pH = 7. Образцы объемом 5 мл отбирались через разные временные интервалы в порядке 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 180, 240, 480, 720 и 1440 мин.

Изотерма адсорбции фенола на ВФП-АУ- H_3PO_4 была завершена путем изучения адсорбции различных концентраций фенола (25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 мг/дм³) при 150 мг дозы ВФП-АУ- H_3PO_4 , pH = 7 и 180 мин времени равновесия. Образцы отбирались из каждого раствора через 180 мин времени равновесия и фильтровались с использованием фильтровальной бумаги с порами 0,2 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выход активированного угля

Активация с применением H_3PO_4 обеспечила высокий уровень выхода продукции (52,7 %), что подтверждает, что фосфорная кислота является эффективным активирующим агентом для гидролиза, дегидратации и оказывает влияние на создание пор [7–11].

Влияние pH

При удалении фенола pH раствора имеет значительное влияние на адсорбцию. Степень ионизации адсорбата в растворе вместе с функциональными группами, присутствующими на поверхности адсорбентов, которые известны как ответственные за поглощение адсорбата, в основном контролируются pH раствора [12]. На рис. 1 показано влияние начального pH раствора на эффективность удаления фенола полученным АУ. Выявлено, что удаление фенола увеличивается при увеличении pH до значения 7, перед тем как снизиться при значениях pH = 9 и pH = 11.

Несколько исследователей связывали стабильность удаления фенола при $\text{pH} < 9$ с его химическим взаимодействием с функциональными группами поверхности АУ (О–Н и С = О) посредством механизма реакции электрон-донор-акцептор [10–12]. При этом функциональные группы АУ действуют как электрон-доноры, а фенол является электрон-акцептором. Возможно, что этот механизм реакции мог объяснить удаление фенола. Снижение адсорбции фенола может быть обусловлено двумя причинами: 1) отрицательные заряды на поверхности АУ увеличивались с увеличением pH, и фенол переходил из молекулярного состояния в ионное состояние, что делало силу отталкивания между ионами фенола и АУ значительной; 2) при таком значении pH про-

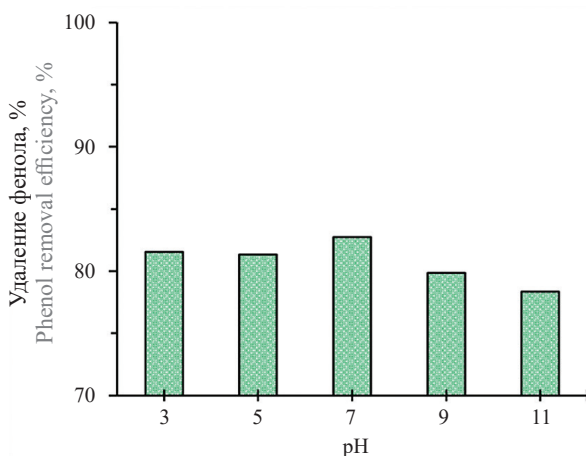


Рис. 1. Влияние изменения pH на адсорбцию фенола с использованием ВФП-АУ-Н₃РО₄ (доза АУ = 3 г/л, начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, время контакта 180 мин)

Fig. 1. Effect of pH changes on phenol adsorption using DPB-AC-H₃PO₄ (dose AC is 3 g/l, initial concentration of phenol is 100 mg/dm³, contact time is 180 minutes)

исходит диссоциация фенола, поскольку рКа фенола равно 9,98 [13]. Образующиеся анионы фенолата более растворимы в водном растворе, и для проведения адсорбции необходимо было разрушить более крепкие связи адсорбата-воды [14–16]. Благодаря высокой и стабильной эффективности удаления, замеченной в диапазоне pH от 3 до 7, значение pH = 7 выбрано как оптимальное для фенола и использовалось в других экспериментах по адсорбции.

Кинетика адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃РО₄

Исследовалось равновесие адсорбции для удаления фенола с использованием ВФП-АУ-Н₃РО₄. Как показано на рис. 2, АУ может эффективно удалить фенол из воды. Процессы адсорбции завершаются за несколько минут. Емкость адсорбции достигает примерно 25 мг/г всего за 10 мин. Кинетику адсорбции можно классифицировать на два этапа: 1) емкость адсорбции быстро увеличивается; 2) адсорбция становится очень медленной и достигает равновесия через 120 мин.

В данном исследовании кинетика адсорбции исследована с использованием моделей псевдопервого и псевдовторого порядка (рис. 3). Параметры исследованных моделей кинетики резюмированы в табл. 1. Кинетика псевдопервого порядка задается уравнением (2), кинетика псевдовторого порядка может быть представлена уравнением (3) и ее линейной формой в уравнении (4) [17–19]:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -K_1 \cdot t; \quad (2)$$

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 (q_e - q_t)^2; \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{q_e}\right)t + \frac{1}{K_2 q_e^2}. \quad (4)$$

где C_t — начальная концентрация фенола, мг/дм³; C_0 — концентрация фенола в момент времени t , мг/дм³; K_1 — константа скорости кинетики псевдопервого порядка, ч⁻¹; K_2 — константа скорости кинетики псевдовторого порядка, л/(мг·ч); q_e и q_t — количество фенола, адсорбированное на адсорбенте, мг/г, в равновесии и в момент времени t соответственно.

Табл. 1. Кинетические параметры адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃РО₄

Table 1. Kinetic parameters of phenol adsorption on DPB-AC-H₃PO₄

Образец Specimen	Параметры псевдопервого порядка Parameters of pseudo first order		Параметры псевдовторого порядка Parameters of pseudo second order		
	$K_1, \text{ч}^{-1} / \text{h}^{-1}$	R^2	$q_e, \text{мг/г}$ mgs/g	$K_2, \text{г/(мг·мин)}$ g/(mg·min)	R^2
ВФП-АУ-Н ₃ РО ₄ DPB-AC-H ₃ РО ₄	0,12	0,5748	27,40	0,0503	0,9999

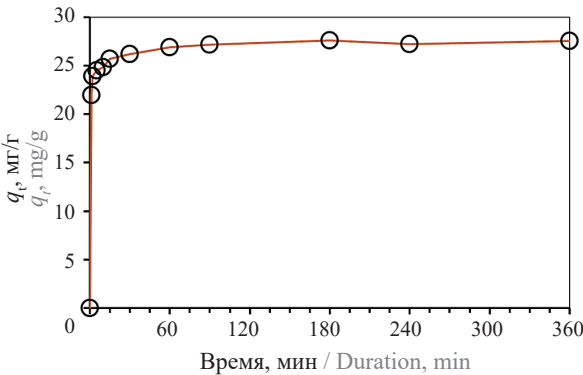


Рис. 2. Влияние времени контакта на адсорбцию фенола на ВФП-АУ-Н₃РО₄ (начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, доза АУ = 3 г/л, рН = 7)

Fig. 2. The effect of contact time on phenol adsorption on DPB-AC-H₃PO₄ (initial phenol concentration is 100 mg/dm³, AC dose is 3 g/l and pH is 7)

Результаты, представленные на рис. 3, 4, указывают на то, что адсорбция фенола на ВФП-АУ-Н₃РО₄ хорошо описывается моделью псевдвторого порядка с высоким R². Авторы работы [20] предположили, что молекулы фенола проникают во внутреннюю поверхность через контролируемую жидкостную пленку. Таким образом, поведение адсорбции фенола на активированных биочарах в основном контролируется химической адсорбцией [21, 22].

Моделирование изотермы адсорбции

Изотерма адсорбции для фенола представлена на рис. 4. Время равновесия 180 мин было предварительно установлено для кинетических экспериментов. Этот тренд впервые смоделирован с использованием изотермы Ленгмюра (рис. 5), представленной уравнением (5) и ее линеаризованной формой согласно уравнению (6). Кроме того, исследование адсорбции также адаптировано под изотерму Фрейндлиха в соответствии с моделью изотермы Фрейндлиха (уравнение (7)) и ее линеаризованной формой (уравнение (8)). Для сравнения результатов изотермы количественным образом получены и перечислены константы изотермы моделей Ленгмюра и Фрейндлиха в табл. 2.

Табл. 2. Константы изотерм адсорбции для изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха для адсорбции фенола на поверхности ВФП-АУ-Н₃РО₄

Table 2. Adsorption isotherms constants for Langmuir and Freundlich isotherms for phenol adsorption on the surface DPB-AC-H₃PO₄

Образец Sample	Параметры изотермы Ленгмюра Parameters of Langmuir isotherm			Параметры изотермы Фрейндлиха Parameters of Freundlich isotherm		
	q _m , мг/г mg/g	K _L , л/мг l/mg	R ²	K _F , (мг/г)(л/мг) ^{1/n} (mg/g)(l/mg) ^{1/n}	n	R ²
ВФП-АУ-Н ₃ РО ₄ DPT-AC-H ₃ РО ₄	77,52	0,0161	0,9215	12,454	3,524	0,8948

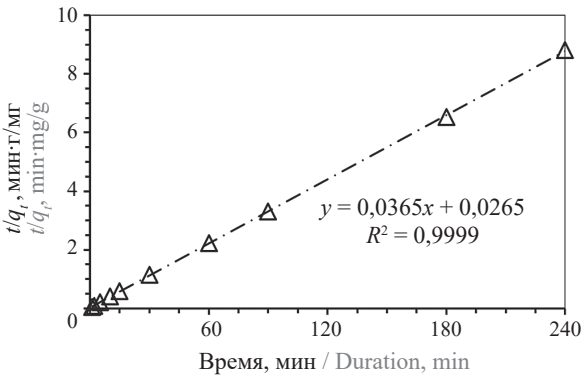


Рис. 3. Кинетическое моделирование псевдвторого порядка для образцов адсорбции фенола ВФП-АУ-Н₃РО₄ (начальная концентрация фенола 100 мг/дм³, АУ = 3 г/л и рН = 7)

Fig. 3. Kinetic simulation of pseudo second order for phenol adsorption specimens of DPB-AC-H₃PO₄ (initial phenol concentration is 100 mg/dm³, AC dose is 3 g/l and pH is 7)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}; \tag{5}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L (q_m)} + C_e \left(\frac{1}{q_m} \right); \tag{6}$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n}; \tag{7}$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e), \tag{8}$$

где q_e — адсорбционная способность, мг/г; q_m — максимальная адсорбционная способность, мг/г; K_L — постоянная Ленгмюра, л/мг; C_e — равновесная концентрация фенола, мг/дм³; n — интенсивность адсорбции; K_F — коэффициент емкости Фрейндлиха, (мг/г)(л/мг)^{1/n}.

Коэффициенты корреляции R² для обеих моделей при 25 °С позволяют сделать вывод, что эмпирическое уравнение Ленгмюра (R² = 0,9215) более удобно, чем уравнение Фрейндлиха (R² = 0,8949), для описания адсорбции фенола на ВФП-АУ-Н₃РО₄. Отмечается постепенное увеличение емкости адсорбции q_e при увеличении значения C_e. Емкость адсорбции также увеличивается с 8 до 70 мг/г до достижения плато, указывая на формирование одно-

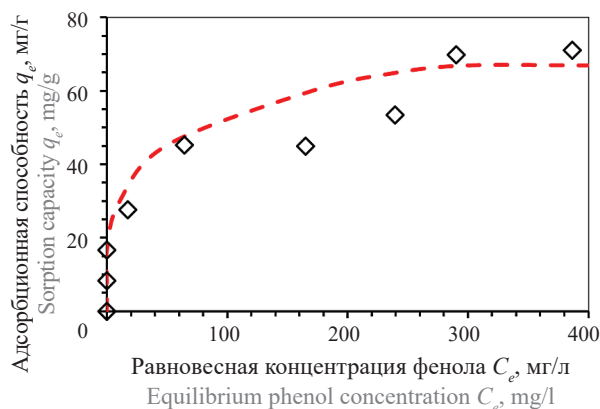


Рис. 4. Изотерма адсорбции поглощения фенола двумя образцами АУ (3 г/дм³ АУ, pH = 7 и время контакта 180 мин)

Fig. 4. The adsorption isotherm of phenol absorption by two specimens of AC (dose of AC is 3 g/dm³, pH is 7 and contact time is 180 min)

слойного покрытия. Другими словами, продукт АУ имел равномерное межфазное место адсорбции для фенола [23].

Изначально увеличение адсорбции фенола с ростом его начальной концентрации в воде может быть обусловлено более высокой силой массопереноса от объемной водной фазы к объемной твердой фазе. Тем не менее по мере достижения насыщенного состояния доступных мест чистая адсорбция также стабилизируется из-за установления равновесия между поверхностью материала АУ и фенолом [24]. Чтобы сравнить эффективность ВФП-АУ-Н₃РО₄ в удалении фенола из водной среды, выполнено сравнение с другими активированными углями, полученными из отходов. По сравнению с предыдущими исследованиями [25–31] максимальная емкость адсорбции фенола $q_{\max}$ составляет 77,52 мг/г для ВФП-АУ-Н₃РО₄, что выше значений, приведенных в литературе. Это говорит о том, что ВФП-АУ-Н₃РО₄ представляет собой многообещающий адсорбент, который может быть использован для удаления фенола.

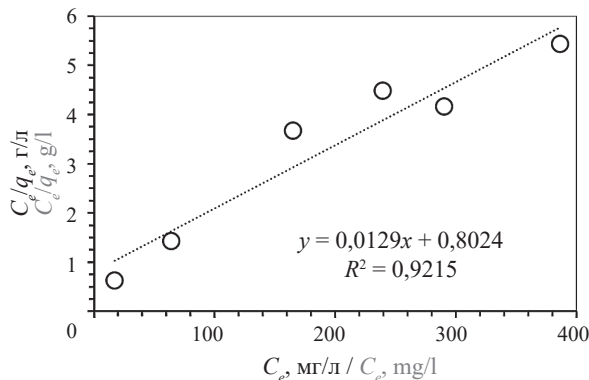


Рис. 5. Изотерма адсорбции Ленгмюра для адсорбции фенола с использованием АУ (3 г/дм³ АУ, pH = 7 и время контакта 180 мин)

Fig. 5. Langmuir adsorption isotherm for phenol adsorption using AC (dose of AC is 3 g/dm³, pH is 7 and contact time is 180 min)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ветви финиковой пальмы были успешно преобразованы в пористый АУ химической активацией с использованием Н₃РО₄ в качестве активирующего агента, чтобы стать возобновляемым и многообещающим адсорбентом для удаления фенола из воды. Исследовалось влияние начального значения pH, начальной концентрации фенола, времени контакта на эффективность процесса адсорбции. Результаты по емкостям адсорбции и эффективности удаления показали, что ВФП-АУ-Н₃РО₄ обладает более высокой активностью к фенолу. Экспериментальные данные по изотерме, скоррелированные с применением моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, показали, что модель Ленгмюра дала наилучшее соответствие. Более того, данные по равновесной адсорбции оказались наилучшими для модели второго порядка, что указывает на то, что механизм адсорбции обусловлен хемисорбцией, вызванной обменом электронами между фенолом и функциональными группами поверхности активированного угля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Артемьянов А.П., Земскова Л.А., Иванов В.В.* Каталитическое жидкофазное окисление фенола в водных средах с использованием катализатора углеродное волокно / (железо, оксид железа) // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 8. С. 88–95. DOI: 10.6060/tcst.2017608.5582. EDN ZDNKPD.

2. *Тамаркина Ю.В., Анищенко В.Н., Редько А.Н., Кучеренко В.А.* Адсорбция фенола активированными углями на основе ископаемых углей разной степени метаморфизма // Химия твердо-

- го топлива. 2021. № 3. С. 3–11. DOI: 10.31857/S0023117721030105. EDN JWZHPL.

3. *Yohi S., Wu C.-M., Koodali R.T.* A kinetic study of photocatalytic degradation of phenol over titania-silica mixed oxide materials under UV illumination // Catalysts. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 193. DOI: 10.3390/catal12020193

4. *Beloborodova N., Bairamov I., Olenin A., Shubina V., Teplova V., Fedotcheva N.* Effect of phenolic acids of microbial origin on production of reactive oxygen species in mitochondria and neutrophils //

Journal of Biomedical Science. 2012. Vol. 19. Issue 1. DOI: 10.1186/1423-0127-19-89

5. *Michalowicz J., Duda W.* Phenols — sources and toxicity // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. Vol. 16. Issue 3. Pp. 347–362. EDN MFIKYZ.

6. *Liew R.K., Chong M.Y., Osazuwa O.U., Nam W.L., Phang X.Y., Su M.H., Cheng C.K.* Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation // Research on Chemical Intermediates. 2018. Vol. 44. Issue 6. Pp. 3849–3865. DOI: 10.1007/s11164-018-3388-y

7. *Enaïme G., Ennaciri K., Ounas A., Bacaoui A., Seffen M., Selmi T.* Preparation and characterization of activated carbons from olive wastes by physical and chemical activation: application to indigo carmine adsorption // Journal of Materials and Environmental Sciences. 2017. Vol. 8. Issue 11. Pp. 4125–4137.

8. *Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M.* Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H_3PO_4 , $ZnCl_2$ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 178. P. 114546. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114546

9. *Gupta A., Balomajumder C.* Simultaneous adsorption of Cr(VI) and phenol from binary mixture using iron incorporated rice husk: insight to multicomponent equilibrium isotherm // International Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2016/7086761

10. *Gupta A., Garg A.* Primary sewage sludge-derived activated carbon: Characterisation and application in wastewater treatment // Clean Technologies and Environmental Policy. 2015. Vol. 17. Issue 6. Pp. 1619–1631. DOI: 10.1007/s10098-014-0895-4

11. *Kacan E.* Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 166. Pp. 116–123. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.044

12. *Gundogdu A., Duran C., Senturk H.B., Soy-lak M., Ozdes D., Serencam H. et al.* Adsorption of phenol from aqueous solution on a low-cost activated carbon produced from tea industry waste: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic study // Journal of Chemical & Engineering Data. 2012. Vol. 57. Issue 10. Pp. 2733–2743. DOI: 10.1021/jc300597u

13. *Dąbrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M.* Adsorption of phenolic compounds by activated carbon : a critical review // Chemosphere. 2005. Vol. 58. Issue 8. Pp. 1049–1070. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.067

14. *Busca G., Berardinelli S., Resini C., Arri-ghi L.* Technologies for the removal of phenol from fluid streams : a short review of recent developments // Jour-

nal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 160. Issue 2–3. Pp. 265–288. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045

15. *Lü G., Hao J., Liu L., Ma H., Fang Q., Wu L. et al.* The adsorption of phenol by lignite activated carbon // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 19. Issue 3. Pp. 380–385. DOI: 10.1016/S1004-9541(09)60224-x

16. *Yang G., Chen H., Qin H., Feng Y.* Amination of activated carbon for enhancing phenol adsorption: Effect of nitrogen-containing functional groups // Applied Surface Science. 2014. Vol. 293. Pp. 299–305. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.12.155

17. *Ho Y.S., McKay G.* Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. 1999. Vol. 34. Issue 5. Pp. 451–465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5

18. *Vieira A.P., Santana S.A.A., Bezerra C.W.B., Silva H.A.S., Chaves J.A.P., de Melo J.C.P. et al.* Kinetics and thermodynamics of textile dye adsorption from aqueous solutions using babassu coconut mesocarp // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 166. Issue 2–3. Pp. 1272–1278. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.043

19. *Qiu H., Lv L., Pan B., Zhang Q.Q., Zhang W., Zhang Q.Q.* Critical review in adsorption kinetic models // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2009. Vol. 10. Issue 5. Pp. 716–724. DOI: 10.1631/jzus.A0820524

20. *Fu Y., Shen Y., Zhang Z., Ge X., Chen M.* Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 646. Pp. 1567–1577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.423

21. *Shi R., Li Y., Yin J., Yang S.* Preparation of activated carbon from corn straw and research of adsorption kinetics // Chinese Journal of Environmental Engineering. 2014. Vol. 8. Issue 8. Pp. 3428–3432.

22. *Al-Malack M.H., Dauda M.* Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017. Vol. 5. Issue 3. Pp. 2718–2729. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.027

23. *Yener J., Kopac T., Dogu G., Dogu T.* Dynamic analysis of sorption of Methylene Blue dye on granular and powdered activated carbon // Chemical Engineering Journal. 2008. Vol. 144. Issue 3. Pp. 400–406. DOI: 10.1016/j.cej.2008.02.009

24. *Srivastava V.C., Swamy M.M., Mall I.D., Prasad B., Mishra I.M.* Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2006. Vol. 272. Issue 1–2. Pp. 89–104. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.07.016

25. *Makrigianni V., Giannakas A., Deligiannakis Y., Konstantinou I.* Adsorption of phenol and methylene blue from aqueous solutions by pyrolytic tire

char: Equilibrium and kinetic studies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. Issue 1. Pp. 574–582. DOI: 10.1016/j.jece.2015.01.006

26. Sierra I., Iriarte-Velasco U., Cepeda E.A., Gameiro M., Aguayo A.T. Preparation of carbon-based adsorbents from the pyrolysis of sewage sludge with CO₂ Investigation of the acid washing procedure // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. Issue 34. Pp. 16053–16065. DOI: 10.1080/19443994.2015.1075428

27. Kumar A., Jena H.M. Removal of methylene blue and phenol onto prepared activated carbon from Fox nutshell by chemical activation in batch and fixed-bed column // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137. Pp. 1246–1259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.177

28. Shen Y., Fu Y. KOH-activated rice husk char via CO₂ pyrolysis for phenol adsorption // *Materials Today Energy*. 2018. Vol. 9. Pp. 397–405. DOI: 10.1016/j.mtener.2018.07.005

29. Da Gama B.M.V., do Nascimento G.E., Sales D.C.S., Rodriguez-Díaz J.M., de Menezes Barbosa C.M.B., Duarte M.M.M.B. Mono and binary component adsorption of phenol and cadmium using adsorbent derived from peanut shells // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 201. Pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.291

30. Kilic M., Apaydin-Varol E., Pütün A.E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics and thermodynamics // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 189. Issue 1–2. Pp. 397–403. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.051

31. Singh K.P., Malik A., Sinha S., Ojha P. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 150. Issue 3. Pp. 626–641. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.017

Поступила в редакцию 29 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 января 2024 г.

Одобрена для публикации 26 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ахмед Самех Абдельфаттах Араби** — ассистент лектора; **Асуанский университет**; 81542, г. Асуан, Египет; аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 58308783500, ORCID: 0000-0003-2845-2749; Sameh.araby@aswu.edu.eg;

Елена Сергеевна Гогина — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4809-5910; gogina-es@yandex.ru;

Николай Алексеевич Макиша — кандидат технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Artem'yanov A.P., Zemskova L.A., Ivanov V.V. Catalytic liquid-phase oxidation of phenol in aqueous media using a carbon fiber catalyst. *ChemChemTech*. 2017; 60(8):88-95. DOI: 10.6060/tcct.2017608.5582. EDN ZDNKPD. (rus.).

2. Tamarkina Iu.V., Anishchenko V.N., Red'ko A.N., Kucherenko V.A. Adsorption of phenol by activated carbons based on fossil carbons of varying degrees of metamorphism. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2021; 3:3-11. DOI: 10.31857/S0023117721030105. EDN JWZHLPL. (rus.).

3. Yohi S., Wu C.-M., Koodali R.T. A kinetic study of photocatalytic degradation of phenol over titania-silica mixed oxide materials under UV illumination. *Catalysts*. 2022; 12(2):193. DOI: 10.3390/catal12020193

4. Beloborodova N., Bairamov I., Olenin A., Shubina V., Teplova V., Fedotcheva N. Effect of phenolic acids of microbial origin on production of reactive oxygen species in mitochondria and neutrophils. *Journal of Biomedical Science*. 2012; 19(1). DOI: 10.1186/1423-0127-19-89

5. Michałowicz J., Duda W. Phenols — Sources and Toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007; 16(3):347-362. EDN MFIKYZ.

6. Liew R.K., Chong M.Y., Osazuwa O.U., Nam W.L., Phang X.Y., Su M.H., Cheng C.K. Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation. *Research on Chemical Intermediates*. 2018; 44(6):3849-3865. DOI: 10.1007/s11164-018-3388-y

7. Enaime G., Ennaciri K., Ounas A., Bacaoui A., Seffen M., Selmi T. Preparation and characterization of activated carbons from olive wastes by physical and chemical activation: application to indigo carmine adsorption. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2017; 8(11):4125-4137.
8. Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M. Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H_3PO_4 , $ZnCl_2$ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*. 2022; 178:114546. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114546
9. Gupta A., Balomajumder C. Simultaneous Adsorption of Cr(VI) and Phenol from Binary Mixture Using Iron Incorporated Rice Husk: Insight to Multicomponent Equilibrium Isotherm. *International Journal of Chemical Engineering*. 2016; 2016:1-11. DOI: 10.1155/2016/7086761
10. Gupta A., Garg A. Primary sewage sludge-derived activated carbon: Characterisation and application in wastewater treatment. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2015; 17(6):1619-1631. DOI: 10.1007/s10098-014-0895-4
11. Kacan E. Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal. *Journal of Environmental Management*. 2016; 166:116-123. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.044
12. Gundogdu A., Duran C., Senturk H.B., Soylak M., Ozdes D., Serencam H. et al. Adsorption of phenol from aqueous solution on a low-cost activated carbon produced from tea industry waste: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic study. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012; 57(10):2733-2743. DOI: 10.1021/jc300597u
13. Dąbrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon : a critical review. *Chemosphere*. 2005; 58(8):1049-1070. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.067
14. Busca G., Berardinelli S., Resini C., Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams : a short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 160(2-3):265-288. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045
15. Lü G., Hao J., Liu L., Ma H., Fang Q., Wu L. et al. The adsorption of phenol by lignite activated carbon. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2011; 19(3):380-385. DOI: 10.1016/S1004-9541(09)60224-x
16. Yang G., Chen H., Qin H., Feng Y. Amination of activated carbon for enhancing phenol adsorption: Effect of nitrogen-containing functional groups. *Applied Surface Science*. 2014; 293:299-305. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.12.155
17. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 1999; 34(5):451-465. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5
18. Vieira A.P., Santana S.A.A., Bezerra C.W.B., Silva H.A.S., Chaves J.A.P., de Melo J.C.P. et al. Kinetics and thermodynamics of textile dye adsorption from aqueous solutions using babassu coconut mesocarp. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 166(2-3):1272-1278. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.043
19. Qiu H., Lv L., Pan B., Zhang Q.Q., Zhang W., Zhang Q.Q. Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2009; 10(5):716-724. DOI: 10.1631/jzus.A0820524
20. Fu Y., Shen Y., Zhang Z., Ge X., Chen M. Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption. *Science of the Total Environment*. 2019; 646:1567-1577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.423
21. Shi R., Li Y., Yin J., Yang S. Preparation of activated carbon from corn straw and research of adsorption kinetics. *Chinese Journal of Environmental Engineering*. 2014; 8(8):3428-3432.
22. Al-Malack M.H., Dauda M. Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017; 5(3):2718-2729. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.027
23. Yener J., Kopac T., Dogu G., Dogu T. Dynamic analysis of sorption of Methylene Blue dye on granular and powdered activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2008; 144(3):400-406 DOI: 10.1016/j.ccej.2008.02.009
24. Srivastava V.C., Swamy M.M., Mall I.D., Prasad B., Mishra I.M. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006; 272(1-2):89-104. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.07.016
25. Makrigianni V., Giannakas A., Deligiannakis Y., Konstantinou I. Adsorption of phenol and methylene blue from aqueous solutions by pyrolytic tire char: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015; 3(1):574-582. DOI: 10.1016/j.jece.2015.01.006
26. Sierra I., Iriarte-Velasco U., Cepeda E.A., Gamero M., Aguayo A.T. Preparation of carbon-based adsorbents from the pyrolysis of sewage sludge with CO_2 . Investigation of the acid washing procedure. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57(34):16053-16065. DOI: 10.1080/19443994.2015.1075428
27. Kumar A., Jena H.M. Removal of methylene blue and phenol onto prepared activated carbon from Fox nutshell by chemical activation in batch and fixed-bed column. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 137:1246-1259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.177
28. Shen Y., Fu Y. KOH-activated rice husk char via CO_2 pyrolysis for phenol adsorption. *Materials Today Energy*. 2018; 9:397-405. DOI: 10.1016/j.mtener.2018.07.005
29. Da Gama B.M.V., do Nascimento G.E., Sales D.C.S., Rodríguez-Díaz J.M., de Menezes Barbo-

sa C.M.B., Duarte M.M.M.B. Mono and binary component adsorption of phenol and cadmium using adsorbent derived from peanut shells. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 201:219-228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.291

30. Kilic M., Apaydin-Varol E., Pütün A.E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics

and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 189(1-2):397-403. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.051

31. Singh K.P., Malik A., Sinha S., Ojha P. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 150(3):626-641. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.017

Received December 29, 2023.

Adopted in revised form on January 26, 2024.

Approved for publication on January 26, 2024.

B I O N O T E S: **Ahmed Sameh** — assistant lecturer; **Aswan University**; Aswan, 81542, Egypt; postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 58308783500, ORCID: 0000-0003-2845-2749; Sameh.araby@aswu.edu.eg;

Elena S. Gogina — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Structures; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklouho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; chief researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 298730, Scopus: 55841908100, ResearcherID: P-7887-2015, ORCID: 0000-0003-4809-5910; gogina-es@yandex.ru;

Nikolay A. Makisha — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center “Water Supply and Sanitation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made equal contribution to the paper.

The authors declare that there is no conflict of interest.