

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

А.К. Горелкина¹, И.В. Тимошук¹, Н.С. Голубева¹, О.В. Беляева¹, Е.С. Михайлова¹

¹ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия,
e-mail: alengora@yandex.ru

Аннотация: Экологическая обстановка, сложившаяся в Кузбассе, определяется антропогенной нагрузкой, характерной для ресурсоориентированных регионов. Горнодобывающая промышленность, в частности добыча каменного угля открытым способом, вносит весомый вклад в загрязнение экосистем угольного региона. Проблема снижения уровня загрязнения водных объектов стоит для предприятий достаточно остро, так как существующие технологические принципы и решения в очистке образующихся на угольных предприятиях стоках в полной мере не отработаны, а подходы, применяемые для очистки других видов сточных вод, не оптимизированы под специфику сточных вод горнодобывающих предприятий. Одним из способов, нашедших широкое применение для очистки стоков различного состава, является адсорбционное извлечение. Для выбора сорбирующего материала, определения механизмов процесса извлечения и других характеристик необходим комплексный подход, позволяющий на основе соответствующих моделей оптимизировать и моделировать процесс очистки. Одним из загрязнителей, характерных для карьерных сточных вод, является железо, пути миграции которого в стоки прослеживаются из различных источников. Показана эффективность применения адсорбции на углеродных сорбентах, изучен механизм массопереноса на основании моделей псевдо-первого порядка Лагергрена, псевдо-второго порядка и методом Р.М. Марутовского, определены лимитирующие стадии извлечения.

Ключевые слова: водные объекты, карьерные сточные воды, очистка, адсорбция, кинетика, кинетические модели, углеродные сорбенты, железо.

Благодарность: Работа выполнена в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022 г., при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Горелкина А. К., Тимошук И. В., Голубева Н. С., Беляева О. В., Михайлова Е. С. Способы снижения воздействия горнодобывающей отрасли на водные экосистемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 64–75. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_64.

Reduction of impact of mining on water ecosystems

A.K. Gorelkina¹, I.V. Timoshchuk¹, N.S. Golubeva¹, O.V. Belyaeva¹, E.S. Mikhailova¹

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, e-mail: alengora@yandex.ru

Abstract: The environmental situation in Kuzbass is governed by the anthropogenic stress typical of resource-oriented regions. The mining industry, in particular, open-pit coal mining contributes immensely to the pollution of ecosystems in this coal region. Reduction of water pollution is an urgent challenge while the current technologies of treatment of coal mine effluents are underdeveloped and approaches to purification of other types of waste water are unadapted to the specifics of the mining industry effluents. One of the ways commonly used to treat waste water of various composition is extraction by adsorption. Selection of an adsorbent and determination of an extraction mechanism or other needs an integrated approach capable to offer modeling and optimization of a water treatment process. One of the pollutants typical of waste water in open pit mines is iron. Iron migrates to effluents from different sources. The efficiency of adsorption at carbon adsorbents is demonstrated, the mechanism of mass transfer is studied using the Lagergren pseudo-first-order kinetics models and by the Marutovsky method, and the limit extraction stages are identified.

Key words: water bodies, open pit mine waste water, purification, adsorption, kinetics, kinetic models, carbon adsorbents, iron.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of a comprehensive scientific and technical program of a full innovation cycle «Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials with a consistent reduction of the environmental burden on the environment and risks to the life of the population», approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 05/11/2022, No. 1144-r, Agreement No. 075-15-2022-1201 dated 30.09.2022, with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Gorelkina A. K., Timoshchuk I. V., Golubeva N. S., Belyaeva O. V., Mikhailova E. S. Reduction of impact of mining on water ecosystems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(7):64-75. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_64.

Введение

Угольная промышленность — это мощный техногенный фактор, вносящий вклад в общую антропогенную нагрузку, оказываемую на среду обитания.

При добыче каменного угля нагрузка на природную среду выражается в загрязнении водных объектов; так, на тонну добытого угля приходится 2,5 м³ сточных вод с высоким уровнем контаминации, 2,16 м² вскрышных пород, 2,17 т загрязняющих веществ попадает в атмосферу. При добыче угля открытым, наиболее экономически выгодным, спо-

собом также происходит отчуждение плодородных почв. Карьерная добыча полезных ископаемых составляет 2/3 от объема добычи.

Приоритетная отрасль, реализуемая в Кузнецком угольном бассейне — добыча углеродного сырья, обуславливает высокий уровень загрязнения водных объектов промышленными стоками разрезов, что снижает биосферные функции водоемов, так как на них оказывается значительное воздействие: ухудшение качественного состава воды подземных водоносных горизонтов, изменение их

положения и снижение полноводности, и, как следствие — уплотнение грунта, формирование депрессивных воронок; изменение водного режима почв и колоссальное загрязнение речного водотока контаминантами различного характера [1]. Опасность представляют также хвостохранилища и ликвидированные горные выработки.

Так как основной источник питьевого водоснабжения в Кузбассе — это поверхностные воды, то нужно учитывать и высокий уровень загрязнения при водоподготовке; так, вода в водотоках региона, расположенных в зонах активной промышленной деятельности, характеризуется как загрязненная и очень загрязненная (данные представлены согласно докладу «О состоянии окружающей среды Кемеровской области в 2021 г.»). В ряде объектов службами мониторинга отмечено «экстремально высокое загрязнение» воды на участках водных объектов [2, 3].

Ежесуточный шахтный и карьерный водоотлив в целом по Кузбассу достигает около 1 млн м³, карьерные воды составляют большую долю от общего стока угледобывающих предприятий, качественный и количественный состав которых определяют горно-геологические и горнотехнические условия разработки месторождений.

Формируемый при открытой угледобыче техногенный неорельеф в виде отвалов и терриконов не только в значительной степени воздействует на почву, но и приводит к загрязнению водоносных горизонтов как поверхностного, так и подземного водотока, выщелачиваемые из породы токсичные микроэлементы попадают в воду.

Недостаточно очищенные стоки угольных предприятий составляют более 1/3 общего сброса контаминантов, привносимых в гидросферу [4]. Влияние на качественные параметры воды оказывают

контаминанты, растворимые в подземных водах, как из угленосных отложений, так и мигрирующие, в том числе из атмосферы. Миграционная способность элементов напрямую определяет состав шахтных и карьерных вод, следовательно, элементы вскрышных пород в той или иной степени определяют микроэлементный состав стоков, при этом миграция может сопровождаться сменой формы, элемент может оставаться в исходном состоянии или происходить частичное изменение [5].

Один из загрязнителей — это железо. Кларк железа в земной коре имеет весомое значение, что обусловлено его наличием в составе различных минералов (пироксены, амфиболы, магнетит, пирит, биотит и гранаты), при контакте минералсодержащей породы с водой высвобождается большое количество железа, которое обычно переходит в относительно нерастворимые и устойчивые окислы железа. Весомая доля железа переносится поверхностными водами в виде твердых частиц, включая коллоиды, и органического вещества. При контакте воды, содержащей ионы двухвалентного железа, с атмосферой может протекать реакция с образованием Fe(OH)₃ и CO₂, при этом растворимость гидроокиси трехвалентного железа достаточно низкая при условии среды, близкой к нейтральной, поэтому большая часть железа в растворе осаждается.

Особо острая экологическая обстановка объективно может быть минимизирована и не является неизбежной. Для снижения глубокого деструктивного воздействия добычи полезных ископаемых существуют различные технологические решения, способствующие оптимизации нарушенных угледобычей экологических условий.

Для удаления из воды каждой группы примесей определены технологические процессы и способы очистки, в то

же время подход к выбору технологии очистки загрязненных вод в полной мере не отработан, а способы, реализуемые для очистки сточных вод других видов предприятий, не оптимизированы под специфику стоков горнодобывающих предприятий и, следовательно, требуют определенной переработки.

Очистка сточных шахтных и карьерных вод — это комплекс мероприятий, порядок выполнения которых определен техническими требованиями к каждому технологическому процессу. Последовательность проведения мероприятий по очистке сточных вод угольных разрезов может быть следующей: • осветление (предварительная механическая очистка); • обеззараживание и деминерализация (интоксикация вредных примесей различными методами); • нейтрализация (использование сильных окислителей) [6].

Принятая на предприятиях технология очистки карьерных вод, сбрасываемых в водные объекты, в основном определяет их качество, а значит, проектирование очистных сооружений необходимо осуществлять с научным обоснованием технологических режимов и параметров очистки для конкретного предприятия.

Очистные сооружения для снижения контаминации карьерных стоков, как в случае со сточными водами предприятий других отраслей, предполагают обязательную биологическую очистку, которая основана на использовании высших растений и микроводорослей, также применяются анаэробные методы очистки, химические методы с использованием геохимических барьеров, физико-химические, в том числе адсорбционные технологии с применением сорбентов различного происхождения [7, 8].

Одним из методов, зарекомендовавшим себя как высокоэффективный при очистке сточных вод от органических

контаминантов, является сорбционное извлечение с использованием сорбентов различной природы [7, 9]. В качестве сорбирующего материала широко используется активный уголь (АУ).

Для научного обоснования и разработки адсорбционной технологии извлечения железа из сточных вод, в основе которой заложен адсорбционный процесс, необходим комплексный подход, выделяющий исследования в статических, кинетических и динамических условиях, цель которого — оптимизация процесса адсорбции без длительных и трудоемких экспериментальных исследований и моделирование режимов очистки для сточных вод различного состава.

В более ранних работах коллектива были освещены исследования по установлению механизма извлечения различных компонентов в равновесных условиях.

В статических условиях адсорбционное извлечение в системе «железо — вода — сорбент» изучалось на модельных растворах в широком концентрационном интервале и было представлено графически в виде изотерм адсорбции. Механизм устанавливался на основании различных адсорбционных моделей, в том числе мономолекулярной адсорбции Ленгмюра и теории объемного заполнения пор Дубинина-Радушкевича. Использование данных моделей позволило не только установить особенности механизма извлечения железа из водных растворов углеродными сорбентами (УС), но и получить основные адсорбционные параметры.

В данной работе исследования направлены на изучение процесса извлечения в кинетических условиях с целью определения, каким путем осуществляется физико-химическая миграция — диффузии, конвекции или их сочетаний, и получения необходимых параметров для инженерных расчетов, требуемых

для дальнейшего моделирования промышленных колонн.

Кинетика адсорбции управляет скоростью поглощения, которая определяет время, необходимое для достижения равновесия в процессе извлечения. Кинетические модели могут дать информацию о путях адсорбции и определить вероятность того или иного механизма [10]. Это также важные данные для изучения динамики процесса и проектирования адсорбционной системы.

Чтобы получить подробные характеристики процесса адсорбции, обычно применяются различные кинетические модели, а именно псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка, Эловича, внутриклеточной диффузии Вебера и другие [11]. Для различных моделей были рассчитаны кинетические константы адсорбции, а значения коэффициентов корреляции линейной регрессии (R^2) позволяют подобрать модель, максимально описывающую процесс извлечения в кинетических условиях.

В работе приведено описание кинетических моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков и представлены кинетические параметры, просчитанные на основании использования этих моделей.

В основе псевдо-первопорядковой модели Лагергрена лежит предположение, что в изменение скорости поглощения растворенного вещества за определенный период времени вносит вклад химическое взаимодействие; это обычно применимо на начальной стадии процесса адсорбции, когда адсорбция происходит за счет диффузии через границу раздела.

Модель Лагергрена псевдо-первого порядка может быть описана следующей формулой:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t),$$

где q_e и q_t (мг/г) представляют собой количества адсорбированного вещества в

равновесии и в момент времени t соответственно; k_1 — константа равновесной скорости в модели псевдо-первого порядка (дм³/мин).

Преобразование выражения в линейный вид позволяет получить уравнение следующего вида:

$$\ln(a_e - a_t) = \ln a_e - k_1 \cdot t,$$

где a_e и a_t (г/г) — значение адсорбции в равновесии и в момент времени t соответственно.

Учитывая, что псевдо-уравнение Лагергрена первого порядка применимо на начальной стадии извлечения, для описания всего диапазона времени адсорбции данная модель применима в частных случаях, обычно модель описывает первые 20–30 мин процесса адсорбции. Линеаризация уравнения в координатах $\lg(q_e - q_t) - t$ позволяет определить константу скорости адсорбции и количество металла, сорбируемое при равновесии.

Кинетическая модель псевдо-второго порядка основана на предположении, что ограничивающим скорость этапом является химическая сорбция или хемосорбция, и позволяет предположить поведение во всем временном диапазоне адсорбции [12].

Дифференциальное уравнение для кинетики псевдо-второго порядка описывается следующим выражением:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2.$$

После математического преобразования модель можно представить в интегрированной форме [13]:

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 a_e^2 + \frac{t}{a_e}},$$

где k_2 — константа равновесной скорости модели псевдо-второго порядка (г/мг мин).

График зависимости t/q_t от времени должен давать линейную зависимость.

Таблица 1

Характеристики активного угля марки АГ-3
Characteristics of AG-3 grade activated carbon

Наименование показателя	Сорбент марки АГ-3
Насыпная плотность, г/дм ³	465,0
Прочность, %	88
Массовая доля общей золы, %	8,00
РН водной вытяжки	6,45
Суммарный объем пор, см ³ /г	0,88
Объем пор, см ³ /г	
микро-	0,26
мезо-	0,09
макро-	0,53
Адсорбционная активность по йоду, %	60,0
Форма гранул	цилиндр

Исходя из наклона $1/q_e$ и пересечения $1/(k_2 q_e^2)$, мы можем рассчитать количество адсорбата, адсорбированного в равновесии, и получить k_2 , коэффициент скорости второго порядка [13].

Для изучения механизма адсорбционного извлечения в кинетических условиях объектом исследования был выбран активный уголь марки АГ-3, показавший наиболее высокую адсорбционную способность по отношению к железу.

Характеристики выбранного сорбента приведены в табл. 1.

Кинетический режим адсорбции железа исследовался согласно методу ограниченного объема, содержание компонента определяли по ГОСТ 4011-72.

Для описания процесса извлечения железа в кинетических условиях выбранным сорбентом использовались модели псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка [14].

Результаты

Экспериментальное изучение скорости извлечения адсорбата углеродным

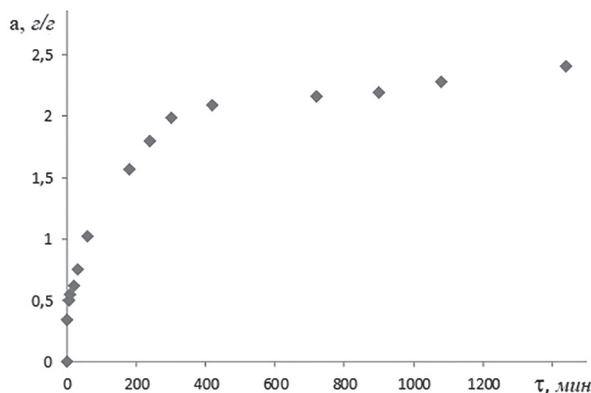


Рис. 1. Кинетическая кривая адсорбционного извлечения в системе «железо – вода – АУ АГ-3», полученная экспериментально

Fig. 1. Kinetic curve of adsorption extraction in the iron – water – AU AG-3 system obtained experimentally

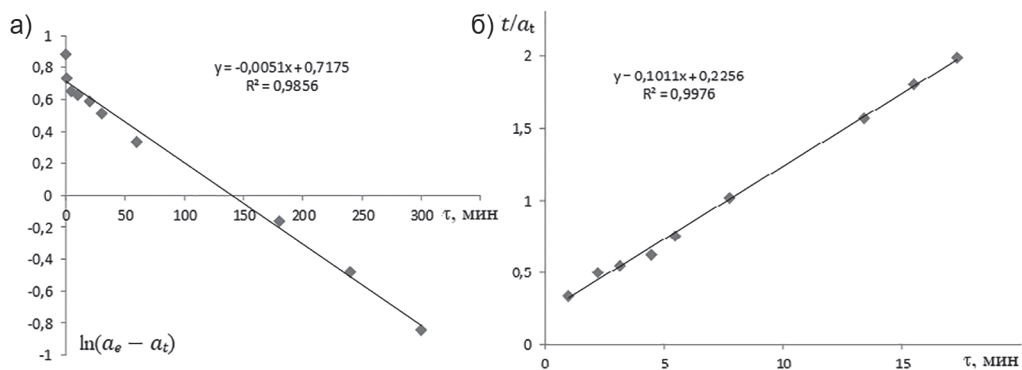


Рис. 2. Описание кинетики адсорбции железа АУ марки АГ-3 в координатах моделей псевдо-первого порядка (а) и псевдо-второго порядка (б)

Fig. 2. Description of the kinetics of the adsorption of iron AU brand AG-3 in the coordinates of the pseudo-I order (a) and pseudo-II order (b) models

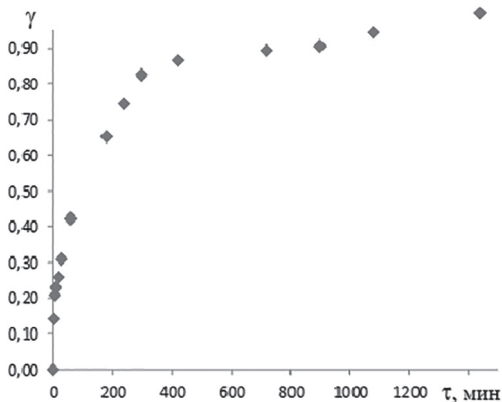


Рис. 3. Зависимость степени достижения адсорбционного равновесия γ от времени адсорбции τ

Fig. 3. Dependences of the degree of achievement of adsorption equilibrium γ on the adsorption time τ

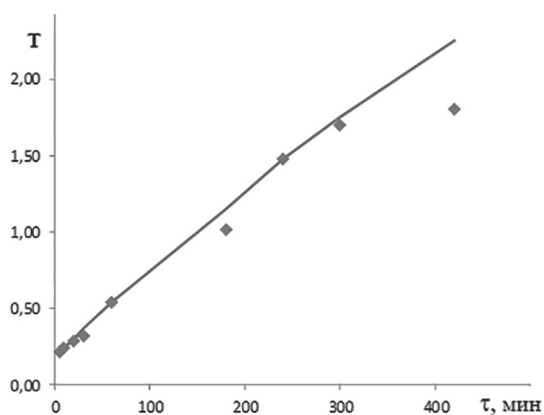


Рис. 4. Теоретическая кинетическая кривая адсорбции в системе активный уголь АГ-3 — вода — железо

Fig. 4. Theoretical kinetic adsorption curves in the AG-3- water-iron activated carbon system

сорбентом отражено на рис. 1 в виде кинетической кривой, графически отражающей изменение величины адсорбции в заданном временном интервале [15].

Сопоставление результатов, полученных в результате эксперимента и с использованием кинетических моделей псевдо-первого порядка и псевдо-второго порядка, показывает удовлетворительную аппроксимацию данных (рис. 2).

Также кинетические кривые проанализированы в координатах γ от τ (рис. 3) и безразмерного коэффициента T от τ (рис. 4):

$$\gamma = \frac{a_\tau}{a_p},$$

где γ — степень достижения равновесия, a_τ адсорбция за время τ ; a_p — значение равновесной адсорбции.

$$T = A\beta_{11}t; A = \left(\frac{V_3}{V_p} + k_1 \right),$$

где $A = \operatorname{tg}\alpha$ — тангенс угла наклона начального участка зависимости T от t , V_3 — суммарный объем массы адсорбента, см³; V_p — объем раствора адсорбата, контактирующего с адсорбентом; k_1 — константа $k_1 = 1/k_r$ (k_r — коэффициент Генри, $k_r = a_p/c_p$).

Обсуждение

Трактуя отраженные на рис. 1 данные, можно четко выделить участки, которые свидетельствуют об изменении в скорости достижения адсорбционного равновесия в широком временном интервале [16]. Так, для начального участка изотермы кинетики характерен достаточно крутой подъем, что предполагает высокую скорость извлечения железа

Таблица 2

Кинетические параметры процесса сорбции железа на АУ марки АГ-3
Kinetic parameters of the iron sorption process on the AU brand AG-3

Экспериментальные данные	Псевдо-первый порядок			Псевдо-второй порядок		
	a_p	k_1	a_p	R^2	k_2	a_p
4,25	0,0051	4,81	0,9856	0,0036	4,28	0,9976

из системы «железо — вода — АГ-3», с увеличением времени контакта скорость адсорбции существенно снижается. Достижение адсорбционного равновесия происходит неравномерно, и вид кривой, несколько отклоняющейся от классического вида, связан именно с нелинейностью данного процесса. Для подтверждения данного предположения было проведено моделирование процесса адсорбции в кинетических условиях, позволяющее выявить кинетические закономерности адсорбции.

Используемые для описания закономерности кинетики сорбции модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка имеют высокую корреляцию (R^2) с экспериментальными данными (табл. 2).

На рис. 2, а отражено описание начальной фазы адсорбции в координатах кинетической модели псевдо-первого порядка, вид кривой позволяет сделать некоторые предположения относительно закономерности адсорбции на описанном этапе, то есть отметить значительное влияние внешней диффузии и определить константу скорости сорбции и величину равновесной сорбции k_1 и a_p .

Для описания результатов эксперимента в широком временном интервале применили уравнение псевдо-второго порядка; график, представленный в соответствующих координатах, отражает прямую на всем исследуемом временном интервале, предположительно на процесс оказывает влияние как диффузия сорбируемого вещества, так и взаимодействие адсорбата и функциональных групп углеродного сорбента. Показатели k_2 и a_p сведены в табл. 2.

Модели псевдо-первого и псевдо-второго порядков применимы и в случае изучаемого процесса извлечения железа АУ марки АГ-3 углями, имеющими схожие характеристики, и значения коэффициентов R^2 подтверждают это; можно считать, что механизм адсорбции исследуемой системы представляет собой сочетание внешней и внутренней диффузионной кинетики, т.е. имеет смешанно-диффузионный характер. При сравнении результатов моделирования нужно отметить, что наиболее точное описание дает модель псевдо-второго порядка.

Важным моментом для кинетических исследований является выявление модели структуры гранул сорбента [17]. На рис. 3 представлена зависимость, позволяющая отнести структуру к квазигомогенной модели, описанной Р.М. Марутовским [18]. Метод основан на построении графиков и их анализе. Прямолинейный участок графика, представленного на рис. 3, характеризуется высокими значениями γ , что предполагает соответствие гранул угля квазигомогенной модели. Зависимость $T = f(\tau)$ (рис. 4) имеет четко прописанный линейный участок, который свидетельствует о внешнем массопереносе в течение 150–170 мин, при степени достижения равновесия равной 0,8 [12].


Рассчитан коэффициент внешнего массопереноса для АУ АГ-3 ионов Fe из индивидуального водного раствора — $0,0262 \text{ мин}^{-1}$ [19, 20]. Модель Р.М. Марутовского подтверждает результаты, полученные с использованием кинетических моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков, т.е. процесс адсорбции контролируется внешним массопереносом в начальный период времени.

Заключение

Моделирование процесса адсорбции в кинетических условиях позволило установить механизм адсорбции железа, т.е. сочетание внешней и внутренней диффузионной кинетики, а именно смешанно-диффузионный характер; выявить модель структуры гранул изучаемых сорбентов; определить коэффициент внешнего массопереноса и предположить, что сорбенты со схожей с АГ-3 структурой и химией поверхности будут иметь тот же механизм взаимодействия. Исследования процесса извлечения в кинетических условиях, в том числе полученные коэффициенты, могут быть использованы для оптимизации на основе математической модели параметров адсорбционной колонны, используемой в качестве адсорбера, и режимов очистки карьерных сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчагина Т. В., Степанов Ю. А., Бурмин Л. Н. Метод оценки экологических показателей воздействия на окружающую среду в районах размещения угольных предприятий // Уголь. — 2018. — № 8. — С. 119–123. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.
2. Левакова И. В., Арустамов Э. А. Некоторые аспекты оценки экологического состояния Кемеровской области // Вестник евразийской науки. — 2019. — № 6. — С. 1–8.
3. Иванова Л. А., Голубева Н. С., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Просеков А. Ю., Сапурин З. П., Медведев А. В. Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек // Экология и промышленность России. — 2023. — Т. 27. — № 1. — С. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-60-65.
4. Тюленев М. А., Лукьянова С. Ю., Папин А. В., Макаревич Е. А. Перенос загрязняющих веществ при фильтрации сточных карьерных вод во вскрышных породах // Вестник КузГТУ. — 2011. — № 2. — С. 22–30.

5. Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Шепель К. В., Собенин А. В., Усманов А. И. Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по имобилизации тяжелых металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 46–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_46.
6. Алексеев Е. В. Теоретические аспекты технологии очистки сточных вод с использованием осадка // Вестник МГСУ. — 2011. — № 8. — С. 270–273.
7. Филатова Е. Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2015. — № 2(13). — С. 97–109.
8. Краснова Т., Горелкина А., Кирсанов М. Использование адсорбции для снижения загрязнения водных ресурсов // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 1. — С. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.
9. Быков В. В. Обезжелезивание артезианской воды на мелкозернистых фильтрующих загрузках // Сантехника. — 2018. — № 4. — С. 56–62.
10. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis // Journal of Colloid and Interface Science. 2004, vol. 276, pp. 47–62. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.03.048.
11. Анурова С. А. Кинетика адсорбции автомобильных расходных жидкостей из водной среды // Вода: химия и экология. — 2012. — № 6. — С. 70–75.
12. Radovic L. R., Silva I. F., Ume J. I. An experimental and theoretical study of the adsorption of aromatic possessing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons // Carbon. 1997, vol. 35, no. 9, pp. 1339–1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(97)00072-9.
13. Podkościelny P., Nieszpore K. Adsorption of phenols from aqueous solutions: Equilibria, calorimetry and kinetics of adsorption // Journal of Colloid and Interface Science. 2011, vol. 354, no. 1, pp. 282–291. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.10.034.
14. Gnanaselvan Gnanasekaran, Arthanareeswaran Gangasalam, Young Sun Mok A high-flux metal-organic framework membrane (PSF/MIL-100 (Fe)) for the removal of microplastics adsorbing dye contaminants from textile wastewater // Separation and Purification Technology. 2021, vol. 277, article 119655. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119655.
15. Xiaoling Ma, Wenlong Wang, Chenggong Sun, Hui Li, Jing Sun, Xin Liu Adsorption performance and kinetic study of hierarchical porous Fe-based MOFs for toluene removal // Science of The Total Environment. 2021, vol. 793, no. 1, article 148622. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148622.
16. Маслова М. В., Иваненко В. И., Герасимова Л. Г. Влияние температуры на кинетику сорбции катионов стронция сорбентом на основе фосфата титана // Журнал физической химии. — 2019. — Т. 93. — № 7. — С. 1002–1008. DOI: 10.1134/S0044453719060219.
17. Antuña-Nieto C., Rodríguez E., López-Antón M. A., García R., Martínez-Tarazona M. R. Mercury adsorption in the gas phase by regenerable Au-loaded activated carbon foams: a kinetic and reaction mechanism study // New Journal of Chemistry. 2020, vol. 44, no. 28, pp. 12009–12018. DOI: 10.1039/D0NJ00898B.
18. Корж Е. А., Клименко Н. А. Моделирование кинетики адсорбции фармацевтических веществ на активных углях // Проблемы науки. — 2017. — № 5(87). DOI: 10.20861/2304-2338-2017-87-004.
19. Trobajo J. R., Antuña-Nieto C., Rodríguez E. Carbon-based sorbents impregnated with iron oxides for removing mercury in energy generation processes // Energy. 2018, vol. 159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.18920.
20. Krasnova T. A., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K., Belyaeva O. V. Effect of priority drinking water contaminants on the quality indicators of beverages during their production and storage // Foods and Raw Materials. 2018, no. 1, pp. 230–241. DOI: 10.21603/2308-4057-2018-1-230-241. 

REFERENCES

1. Korchagina T. V., Stepanov Yu. A., Burmin L. N. Method for assessing environmental impact indicators in the areas of coal enterprises. *Ugol'*. 2018, no. 8, pp. 119–123. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.
2. Levakova I. V., Arustamov E. A. Some aspects of the assessment of the ecological state of the Kemerovo region. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019, no. 6, pp. 1–8. [In Russ].
3. Ivanova L. A., Golubeva N. S., Tymoshchuk I. V., Gorelkina A. K., Prosekov A. Yu., Sapurin Z. P., Medvedev A. V. Assessment of the efficiency of wastewater treatment of a coal mining enterprise and its impact on the pollution of small rivers. *Ecology & Industry of Russia*. 2023, vol. 27, no. 1, pp. 60–65. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-60-65.
4. Tyulenev M. A., Lukyanova S. Yu., Papin A. V., Makarevich E. A. Transfer of pollutants during filtration of waste quarry waters in overburden rocks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2011, no. 2, pp. 22–30. [In Russ].
5. Antoninova N. Yu., Shubina L. A., Shepel K. V., Sobenin A. V., Usmanov A. I. Assessment of the possibility of using industrial waste in the development of measures for the immobilization of heavy metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 46–55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_46.
6. Alekseev E. V. Theoretical aspects of wastewater treatment technology using sludge. *Vestnik MGSU*. 2011, no. 8, pp. 270–273. [In Russ].
7. Filatova E. G. Review of wastewater treatment technologies from heavy metal ions based on physico-chemical processes. *Izvestiya vuzov. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2015, no. 2(13), pp. 97–109. [In Russ].
8. Krasnova T., Gorelkina A., Kirsanov M. The use of adsorption to reduce water pollution. *Ecology & Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 44–49. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.
9. Bykov V. V. De-ironing of artesian water on fine-grained filter loadings. *Santekhnika*. 2018, no. 4, pp. 56–62. [In Russ].
10. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 276, pp. 47–62. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.03.048.
11. Anurova S. A. Kinetics of adsorption of automotive consumable liquids from an aqueous medium. *Water: chemistry and ecology*. 2012, no. 6, pp. 70–75. [In Russ].
12. Radovic L. R., Silva I. F., Ume J. I. An experimental and theoretical study of the adsorption of aromatic possessing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons. *Carbon*. 1997, vol. 35, no. 9, pp. 1339–1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(97)00072-9.
13. Podkościelny P., Nieszpore K. Adsorption of phenols from aqueous solutions: Equilibria, calorimetry and kinetics of adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011, vol. 354, no. 1, pp. 282–291. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.10.034.
14. Gnanaselvan Gnanasekaran, Arthanareeswaran Gangasalam, Young Sun Mok A high-flux metal-organic framework membrane (PSF/MIL-100 (Fe)) for the removal of microplastics adsorbing dye contaminants from textile wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2021, vol. 277, article 119655. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119655.
15. Xiaoling Ma, Wenlong Wang, Chengong Sun, Hui Li, Jing Sun, Xin Liu Adsorption performance and kinetic study of hierarchical porous Fe-based MOFs for toluene removal. *Science of The Total Environment*. 2021, vol. 793, no. 1, article 148622. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148622.
16. Maslova M. V., Ivanenko V. I., Gerasimova L. G. Influence of temperature on the kinetics of sorption of strontium cations by a sorbent based on titanium phosphate. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2019, vol. 93, no. 7, pp. 1002–1008. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0044453719060219.
17. Antuña-Nieto C., Rodríguez E., López-Antón M. A., García R., Martínez-Tarazona M. R. Mercury adsorption in the gas phase by regenerable Au-loaded activated carbon foams: a kinetic and reaction mechanism study. *New Journal of Chemistry*. 2020, vol. 44, no. 28, pp. 12009–12018. DOI: 10.1039/D0NJ00898B.

18. Korzh E. A., Klimentko N. A. Modeling of the kinetics of adsorption of pharmaceutical substances on activated carbons. *Problemy nauki*. 2017, no. 5(87). [In Russ]. DOI: 10.20861/2304-2338-2017-87-004.

19. Trobajo J. R., Antuña-Nieto C., Rodríguez E. Carbon-based sorbents impregnated with iron oxides for removing mercury in energy generation processes. *Energy*. 2018, vol. 159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.18920.

20. Krasnova T. A., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K., Belyaeva O. V. Effect of priority drinking water contaminants on the quality indicators of beverages during their production and storage. *Foods and Raw Materials*. 2018, no. 1, pp. 230 – 241. DOI: 10.21603/2308-4057-2018-1-230-241.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горелкина Алена Константиновна¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: alengora@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3782-2521,

Тимошук Ирина Вадимовна¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: irina190978@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1349-2812,

Голубева Надежда Сергеевна¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: golnadya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2188-8331,

Беляева Оксана Владимировна¹ — канд. хим. наук,
доцент, e-mail: beljaeva1@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3030-9140,

Михайлова Екатерина Сергеевна¹ — канд. хим. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0673-0747,

¹ Кемеровский государственный университет.

Для контактов: Горелкина А.К., e-mail: alengora@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.K. Gorelkina¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: alengora@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3782-2521,

I.V. Timoshchuk¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: irina190978@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1349-2812,

N.S. Golubeva¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: golnadya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2188-8331,

O.V. Belyaeva¹, Cand. Sci. (Chem.),
Assistant Professor, e-mail: beljaeva1@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3030-9140,

E.S. Mikhailova¹, Cand. Sci. (Chem.),
Senior Researcher, e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0673-0747,

¹ Kemerovo State University, 650000, Kemerovo, Russia.

Corresponding author: A.K. Gorelkina, e-mail: alengora@yandex.ru.

Получена редакцией 09.02.2023; получена после рецензии 23.03.2023; принята к печати 10.06.2023.

Received by the editors 09.02.2023; received after the review 23.03.2023; accepted for printing 10.06.2023.