

# ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ МЫШЬЯКА, СВИНЦА И КАДМИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ: АДсорбция И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Ф. В. ЮСУБОВ**<sup>1</sup>, зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф.  
**А. Н. СУЛЕЙМАНОВА-РАХМАНЛЫ**<sup>2</sup>, старший преподаватель,  
Suli\_ay@mail.ru  
**С. Р. НАМАЗОВА**<sup>3</sup>, преподаватель

<sup>1</sup>Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Академия Министерства чрезвычайных ситуаций Азербайджана, Баку, Азербайджан

<sup>3</sup>Азербайджанский университет архитектуры и строительства, Баку, Азербайджан

## Введение

Современное развитие горнодобывающей промышленности сопровождается образованием значительных объемов шахтных сточных вод, загрязненных токсичными компонентами, в частности тяжелыми металлами. Среди них особую опасность представляют мышьяк (As), свинец (Pb) и кадмий (Cd), обладающие высокой биоаккумуляцией, канцерогенностью и стойкостью в природной среде. Их удаление из сточных вод горных предприятий – важная задача как в плане экологической безопасности, так и в рамках выполнения требований природоохранного законодательства. Одним из наиболее эффективных методов удаления тяжелых металлов является адсорбция на пористых материалах, среди которых активированный уголь занимает ведущую позицию на основании высокой удельной поверхности, химической стабильности и доступности.

Несмотря на широкое применение, эффективность адсорбции зависит от множества факторов, включая кислотность среды, начальную концентрацию загрязнителей, температуру и дозу сорбента. Для повышения эффективности процесса адсорбции и оптимизации параметров очистки целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее описать динамику массопереноса и распределения загрязнителей в объеме сорбента. Совмещение лабораторных экспериментов с численным моделированием обеспечивает надежную основу для проектирования систем очистки, адаптированных к конкретным условиям горных предприятий. Настоящее исследование направлено на изучение процесса адсорбционного удаления As, Pb и Cd из шахтных сточных вод с использованием активированного угля. В рамках работы проведены лабораторные эксперименты, построена математическая

В условиях усиливающегося антропогенного воздействия и роста экологических рисков отмечена необходимость внедрения эффективных и устойчивых технологий очистки сточных вод. Проведены лабораторные исследования, направленные на изучение влияния технологических параметров – pH среды, дозы сорбента и времени контакта – на эффективность удаления загрязнителей. На основе полученных данных построена математическая модель массопереноса с учетом внешней и внутренней диффузии, а также изотермической адсорбции. Верификация модели с использованием экспериментальных данных продемонстрировала ее высокую точность и применимость для инженерных расчетов, что позволяет более точно прогнозировать поведение системы при различных режимах и масштабах эксплуатации.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, горнодобывающая промышленность, очистка сточных вод, тяжелые металлы, активированный уголь, математическое моделирование

**DOI:** 10.17580/gzh.2026.05.10

модель адсорбции, выполнены ее численная реализация и сопоставление с экспериментальными данными.

Удаление тяжелых металлов из шахтных и горнопромышленных сточных вод является активно развивающимся направлением исследований. Согласно данным [1–3], мышьяк, свинец и кадмий относятся к приоритетным загрязнителям водной среды, их содержание подлежит обязательному контролю в соответствии с национальными и международными экологическими стандартами. Основными источниками поступления указанных элементов в водные системы являются процессы добычи и переработки металлических руд, а также водоотлив из шахт. Наиболее распространенные технологии удаления тяжелых металлов включают ионный обмен, химическое осаждение, мембранные процессы и сорбционные методы [4, 5].

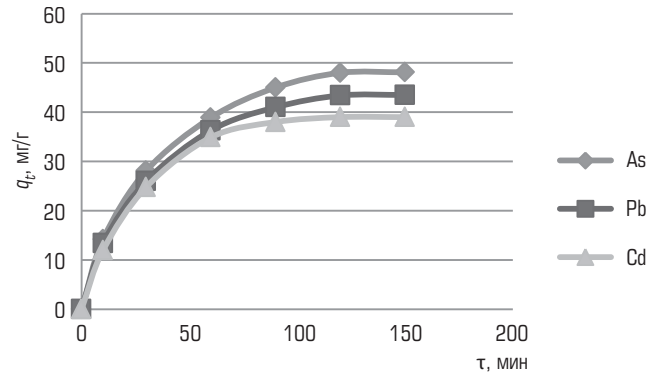
Среди них адсорбция считается одной из наиболее перспективных в силу своей универсальности, простоты реализации, сравнительно низких затрат и высокой эффективности при низких концентрациях загрязнителей. Активированный уголь широко применяют для очистки воды от органических и неорганических соединений, включая тяжелые металлы [6–8]. Он характеризуется развитой микропористой структурой, большой удельной поверхностью (до 1500 м<sup>2</sup>/г) и возможностью модификации поверхности под конкретные задачи. Эффективность адсорбции As, Pb и Cd зависит от различных

параметров: pH раствора, температуры, начальной концентрации металлов, времени контакта и типа углеродного материала [9–11]. Для описания кинетики и изотерм адсорбции широко применяют модели Ленгмюра, Фрейндлиха, а также псевдопервого и псевдвторого порядка [12]. Однако такие модели, как правило, описывают равновесные состояния, не учитывая пространственно-временное распределение концентраций. В связи с этим особую актуальность приобретают математические модели, основанные на уравнениях нестационарного массопереноса в пористых средах, которые позволяют описывать динамику процесса и прогнозировать поведение системы при различных условиях [13–15].

В литературе описано множество подходов к численному решению подобных задач, включая метод конечных разностей, метод конечных элементов и методы Монте-Карло [14, 16]. Однако интеграция таких моделей с данными лабораторных экспериментов применительно к шахтным сточным водам остается недостаточно проработанной, что обуславливает необходимость проведения настоящего исследования.

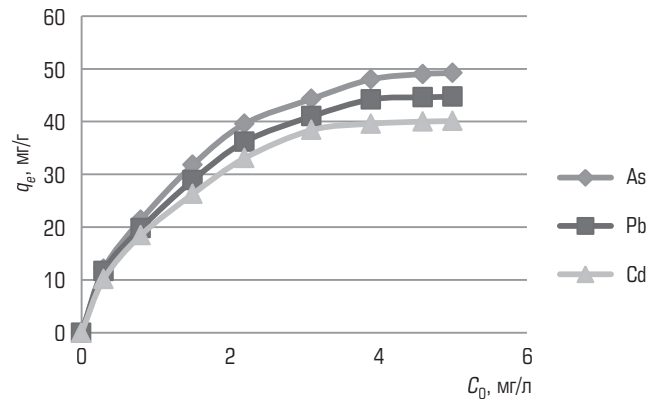
### Методика проведения экспериментов

Объектом исследования являлись имитационные шахтные сточные воды, содержащие тяжелые металлы – мышьяк (As), свинец (Pb) и кадмий (Cd). Рабочие растворы подготовлены на дистиллированной воде с добавлением соответствующих солей:  $As_2O_3$  (мышьяк),  $Pb(NO_3)_2$  (свинец) и  $CdCl_2 \cdot H_2O$  (кадмий) в концентрациях, соответствующих характерным уровням загрязнения шахтных вод (от 1 до 5 мг/л). Контроль параметров среды (pH, температуры) осуществляли с использованием лабораторного оборудования (pH-метр, термостата). В качестве сорбента использовали порошкообразный активированный уголь (марка БАУ-А), полученный из древесного сырья, с удельной поверхностью  $\sim 1100 \text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером частиц 100–250 мкм. Перед использованием уголь промывали дистиллированной водой и сушили при  $105^\circ\text{C}$  в течение 24 ч. Также определяли его кислотно-основные свойства, зольность и сорбционную емкость. Эксперименты проводили в статических условиях (при температуре  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ ). В стеклянные колбы объемом 250 мл вносили заданный объем модельного раствора и определенное количество активированного угля (0,5–1,5 г/л). Смеси перемешивали на магнитной мешалке в течение от 50 до 150 мин. По завершении каждого опыта суспензию фильтровали и в полученном фильтрате определяли остаточное содержание As, Pb и Cd. Концентрации металлов устанавливали с использованием атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС) на приборе AA-7000 (Shimadzu) с предварительной пробоподготовкой. Все эксперименты проводили трижды; результаты усредняли, погрешность не превышала 0,5 %. Параметры, варьируемые в эксперименте: pH раствора 2–12; начальная концентрация металлов 1–5 мг/л; доза сорбента 0,5–1,5 г/л; время контакта 50–150 мин.



**Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции As, Pb и Cd**

$q_e$  – количество вещества, адсорбированного на адсорбенте;  
 $\tau$  – время



**Рис. 2. Изотерма адсорбции As, Pb и Cd**

$q_e$  – количество вещества, адсорбированного на адсорбенте;  
 $C_0$  – начальная концентрация адсорбента

На основе полученных данных строили кинетические кривые (рис. 1) и изотермы адсорбции (рис. 2), рассчитывали параметры модели Ленгмюра, а также скорости адсорбции по псевдопервому.

Как видно из рис. 1, время обработки адсорбционной емкости адсорбента составляет 100 мин. Соответственно на рис. 2 показано, что максимальная величина равновесной адсорбции составляет 49 мг/г. На рис. 3 изображены контурные графики зависимости выхода от начальной концентрации и доза сорбента. Из рис. 3 следует, что минимальная выходная концентрация металлов (0,0032 мг/л) обеспечена при начальной концентрации 1 мг/л и дозе сорбента 1 г/л. На рис. 4 показаны контурные графики зависимости выхода от числа pH и дозы сорбента. Видно, что минимальная выходная концентрация металлов (0,0032 мг/л) достигнута при  $\text{pH} = 6,8$  и дозе сорбента 1,15 г/л. На рис. 5 изображен поверхностный участок для поглотительной способности при различных параметрах процесса поглощения. На рис. 6 представлена диаграмма

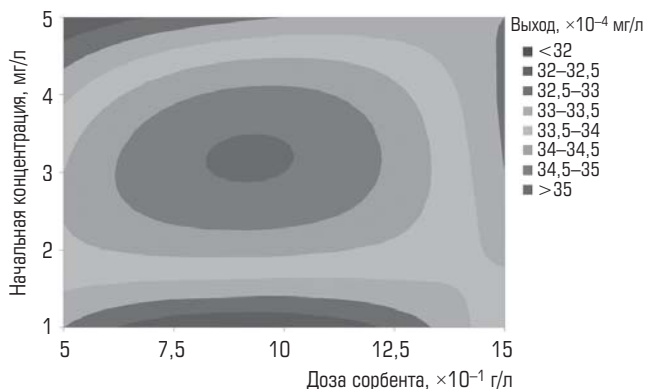


Рис. 3. Контурные графики зависимости выхода от начальной концентрации и дозы сорбента

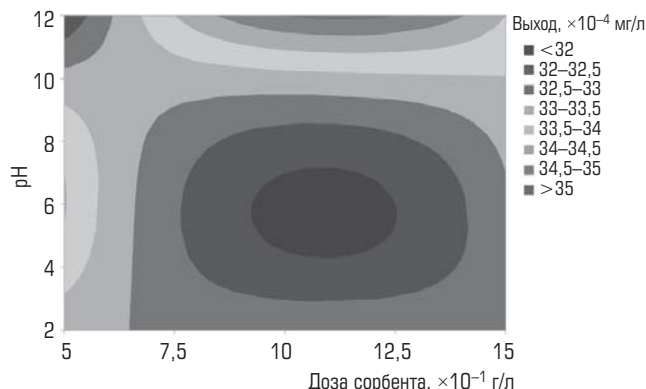


Рис. 4. Контурные графики зависимости выхода от показателя pH и дозы сорбента

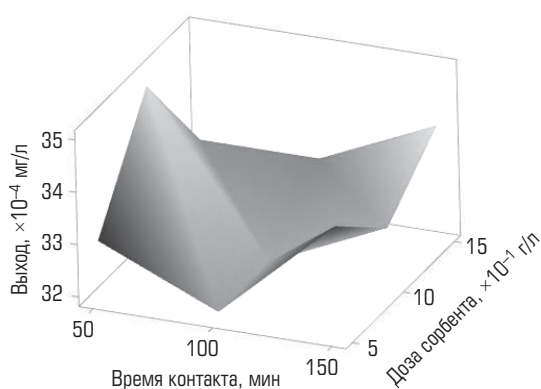


Рис. 5. Поверхностный участок для поглотительной способности в зависимости от различных параметров процесса поглощения

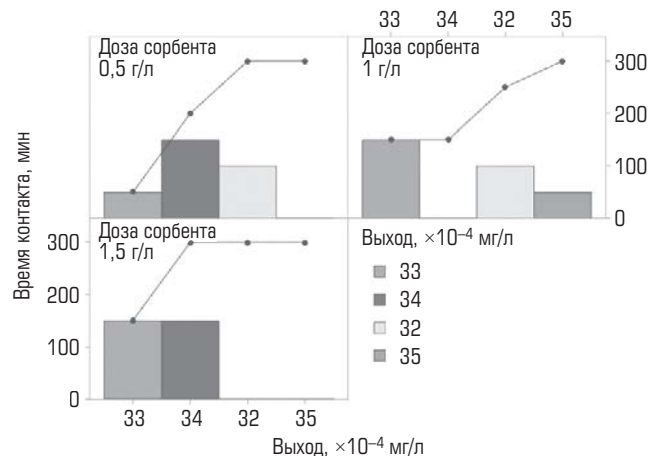


Рис. 6. Диаграмма Парето влияния параметров процесса адсорбции на выходную концентрацию

Парето влияния параметров процесса адсорбции на выходную концентрацию. Как видно из рис. 5 и 6 минимальная выходная концентрация металлов (0,0032 мг/л) получена при продолжительности контакта 100 мин и дозе сорбента 1,14 г/л. Допустимые пределы концентрации тяжелых металлов, таких как As, Pb и Cd, в шахтных и горнопромышленных сточных водах могут варьироваться в зависимости от требований законодательства и экологических стандартов разных стран. В России для сточных вод приняты: ПДК (предельно допустимая концентрация) мышьяка в 0,05 мг/л, свинца 0,1 мг/л и кадмия 0,01 мг/л.

### Материалы и методы исследования

Загрязнение шахтных сточных вод тяжелыми металлами, такими как мышьяк, свинец и кадмий, остается одной из наиболее острых экологических проблем в горнодобывающей промышленности. Эти элементы обладают высокой токсичностью, кумулятивными свойствами и представляют серьезную

угрозу для здоровья человека и окружающей среды. В районах активной добычи полезных ископаемых в горнопромышленных регионах России и других стран СНГ наблюдается повышенное содержание тяжелых металлов в дренажных и шахтных водах, что требует эффективных методов очистки. Среди доступных решений наиболее привлекательны адсорбционные методы вследствие их относительной простоты, эффективности и экологической безопасности. Активированный уголь, обладающий развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, остается одним из наиболее универсальных и широко применяемых сорбентов для удаления тяжелых металлов. Однако эффективность адсорбции существенно зависит от условий среды (pH, концентрации, времени контакта), что требует комплексного подхода к проектированию очистных систем.

В связи с этим важным направлением современной инженерной гидродинамики является разработка и верификация математических моделей, описывающих процессы

массопереноса и адсорбции. Совмещение экспериментальных данных с численным моделированием позволяет оптимизировать параметры технологии и повысить ее промышленную применимость.

Таким образом, исследование, направленное на адсорбционное удаление As, Pb и Cd из шахтных сточных вод с использованием активированного угля и математическое моделирование этого процесса, является актуальным как относительно охраны окружающей среды, так и в контексте устойчивого развития горнопромышленных регионов.

В расчетах использована изотерма Ленгмюра, которая выглядит следующим образом:  $q(C) = q_{\max} K_L C / (1 + K_L C)$ , где  $q(C)$  – концентрация адсорбированного вещества, мг/г;  $q_{\max}$  – максимальная адсорбционная емкость, мг/г;  $C$  – концентрация вещества, которое адсорбируется, в жидкой фазе в данный момент равновесия. Значения  $q(C) = q_e$  ( $q_e$  – количество вещества, адсорбированного на адсорбенте, мг/г) рассчитанные по модели, немного выше экспериментальных, что типично при хорошей аппроксимации. Константа скорости  $K_L$  показывает, что процесс быстро достигает равновесия (в течение первых 90 мин). Модель хорошо описывает данные, подтверждая механизм адсорбции.

Цель моделирования – описать динамику удаления тяжелых металлов (As, Pb, Cd) из шахтных сточных вод при их адсорбции на активированном угле с учетом внутренних процессов диффузии и сорбции в пористой структуре сорбента. Рассматривается сферическая частица активированного угля радиусом  $R$ , погруженная в раствор, содержащий примеси. Предполагается, что процесс протекает в изотермических условиях, в однородной фазе, без химического превращения, и основной механизм переноса вещества – диффузия с последующей адсорбцией.

Модель основана на уравнении нестационарной диффузии с термино адсорбции во внутреннем объеме сорбента:

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right) - \alpha \frac{\partial q(C)}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $C(r,t)$  – концентрация загрязнителя в поровом растворе внутри частицы, мг/л;  $r$  – радиальная координата, расстояние от центра частицы (например, гранулы адсорбента), м;  $t$  – время, показывающее, как процесс меняется, с;  $D_{\text{eff}}$  – эффективный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha$  – коэффициент обмена массой (величина, зависящая от плотности сорбента и пористости).

Для описания равновесной сорбции использована изотерма Ленгмюра:

$$q(C) = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C}, \quad (2)$$

где  $K_L$  – константа Ленгмюра, л/мг.

Для решения уравнений массопереноса в жидкой и твердой фазах необходимо задать граничные условия. В жидкой

### Параметры модели Ленгмюра, полученные на основе экспериментальных данных

Металл	$q_{\max}$ , мг/г	$K_L$ , л/мг
As	49,12	0,667
Pb	45,54	0,894
Cd	39,27	0,422

фазе:  $C_{\text{ж}}(0, t) = C_s$  (на границе раствор – сорбент); в пористой фазе:  $C(r,0) = 0$  (начальная концентрация в порах),  $\frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$  (симметрия в центре поры).

Для общей концентрации в растворе:

$$\frac{dC_{\text{ж}}}{dt} = -\frac{k_{\text{ext}} A}{V_{\text{ж}}} (C_{\text{ж}} - C_s(t)), \quad (3)$$

где  $C_{\text{ж}}$  – концентрация вещества в жидкой фазе (в растворе), мг/г или моль/м<sup>3</sup>;  $k_{\text{ext}}$  – коэффициент внешней диффузии, м/с;  $A$  – площадь поверхности угля, доступная для адсорбции, м<sup>2</sup>;  $V_{\text{ж}}$  – объем раствора;  $C_s(t)$  – концентрация загрязнителя на поверхности сорбента. В **таблице** приведены параметры модели Ленгмюра, полученные на основе экспериментальных данных.

Для численного решения использовали метод конечных разностей в сферических координатах. Уравнение диффузии дискретизировали по координате  $r$ , а решение по времени осуществляли с использованием метода Рунге – Кутты [16]. Численные расчеты выполняли до достижения стационарного состояния или до времени, соответствующего завершению эксперимента. Параметры модели ( $D_{\text{eff}}$ ,  $q_{\max}$ ,  $K_L$ ,  $\alpha$ ) подбирали методом наименьших квадратов на основе экспериментальных кривых время – концентрация. Эта модель позволяет учесть более сложные процессы, такие как внешняя диффузия, которая в реальных условиях может значительно влиять на эффективность адсорбции, особенно при высоких концентрациях загрязнителей в растворе. С помощью этой модели можно точнее прогнозировать поведение системы в зависимости от различных параметров и оптимизировать технологический процесс очистки.

### Обсуждение результатов

На рис. 1 приведены кинетические кривые изменения концентрации As, Pb и Cd в растворе с течением времени при адсорбции на активированном угле. Экспериментальные данные были получены для растворов с начальной концентрацией металлов 5 мг/л и дозой угля 1 г/л. Как видно из графиков, скорость удаления загрязнителей с течением времени значительно увеличивается в первые 30 мин, после чего процесс замедляется и достигает стационарного состояния. Это типичное поведение для процессов адсорбции, где наиболее интенсивная сорбция происходит в начальный период, когда

сорбент еще не насыщен. Моделирование кинетики адсорбции с учетом двухфазной модели (внешней и внутренней диффузии) показало хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает эффективность предложенной модели. В частности, наибольшие расхождения наблюдаются в поздних стадиях адсорбции, когда процесс приближается к равновесному состоянию. Это может быть связано с тем, что в эти моменты внешняя диффузия становится ограничивающим фактором, особенно при высоких концентрациях загрязнителей.

Для анализа равновесной адсорбции был построен график зависимости адсорбированной массы загрязнителя от его концентрации в растворе. На рис. 2 представлены изотермы адсорбции для As, Pb и Cd при  $pH = 7$  и температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эти данные также были использованы для подбора параметров модели Ленгмюра. Изотермы демонстрируют типичное для адсорбции на активированном угле поведение, характеризующееся достижением максимальной емкости сорбента при высоких концентрациях загрязнителей. Константы Ленгмюра  $K_L$  и максимальная адсорбционная емкость  $q_{\max}$  были рассчитаны методом наименьших квадратов, и полученные значения хорошо согласуются с литературными данными.

Для As, Pb и Cd были получены следующие значения  $q_{\max}$ , мг/г: As – 49,12; Pb – 45,54; Cd – 39,27. Результаты численного моделирования с учетом как внешней диффузии, так и диффузии внутри пор сорбента показали, что в начале процесса адсорбции внешний перенос загрязнителей от раствора к поверхности угля ограничивает скорость реакции. Однако по мере насыщения поверхности сорбента внутренний перенос (диффузия в порах угля) становится более важным фактором. Ниже приведены затраты на очистку  $1000\text{ м}^3$  сточных вод, руб.:

Сорбент	46000
Энергия	900
Операционные расходы	18000
Регенерация	2100

Для  $1000\text{ м}^3$  сточных вод общие затраты на очистку с использованием активированного угля составляют

67 тыс. руб., что является экономически обоснованным выбором с учетом возможных штрафов за загрязнение и экологических рисков. Если очищенные сточные воды можно реализовать для других целей (например, для полива или промышленного использования), то это может обеспечить дополнительные доходы или экономию.

## Заключение

1. Исследование показало, что активированный уголь является высокоэффективным сорбентом для удаления тяжелых металлов – мышьяка (As), свинца (Pb) и кадмия (Cd) – из шахтных сточных вод. Максимальная адсорбционная емкость составила 49,12 мг/г для As, 45,54 мг/г для Pb и 39,27 мг/г для Cd, что свидетельствует о высокой эффективности активированного угля при очистке загрязненных вод до уровня, соответствующего нормативным требованиям. Таким образом, использование активированного угля позволяет эффективно снижать содержание указанных металлов в сточных водах до безопасного уровня как по европейским, так и по российским нормативам.

2. Концентрация загрязнителей в растворе существенно зависит от pH среды. В кислой среде эффективность удаления As и Cd значительно возрастает, в то время как для Pb оптимальный показатель pH находится в нейтральной зоне. Это подтверждает необходимость учета pH при проектировании и эксплуатации установок очистки.

3. С помощью численного моделирования и подбора параметров модели Ленгмюра (например, констант  $K_L$  и максимальной емкости  $q_{\max}$ ) удалось точно воспроизвести кинетику адсорбции, что подтверждает корректность выбранной модели. Это открывает возможности для ее использования в промышленных масштабах для прогнозирования и оптимизации процесса очистки сточных вод.

4. Разработанная модель может быть использована для оптимизации процессов очистки шахтных сточных вод, особенно в условиях, где состав и концентрация загрязнителей могут изменяться. Результаты могут быть полезны для внедрения в практику горнодобывающих предприятий, стремящихся снизить влияние своих сточных вод на окружающую среду.


## Библиографический список

1. Размахнин К. К., Шумилова Л. В., Размахнина И. Б. Очистка сточных и оборотных вод горнопромышленных предприятий адсорбентами на основе цеолитсодержащих пород Холинского месторождения // ФТПРПИ. 2024. № 4. С. 180–188.
2. Смирнов А. В., Смирнов В. Н., Смирнов К. В. Очистка шахтных сточных вод с использованием природных сорбентов в условиях стационарных очистных сооружений предприятий металлургии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 62–76.
3. Amen R., Bashir H., Bibi I., Shaheen S. M., Niazi N. K. et al. A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions // Chemical Engineering Journal. 2020. Vol. 396. ID 125195.
4. Юсубов Ф. В. Условия неравновесной адсорбции ионов тяжелых металлов на цеолитах // Химия и технология воды. 2019. Т. 41. № 1. С. 102–111.
5. Куликова А. А., Стельмахов А. А., Бачева Т. А., Цымбал М. Н. Очистка вод, поступающих из затопленных шахт и рудников // ГИАБ. 2020. № 6. С. 38–47.
6. Горелкина А. К., Тимошук И. В., Голубева Н. С., Беляева О. В., Михайлова Е. С. Способы снижения воздействия горнодобывающей отрасли на водные экосистемы // ГИАБ. 2023. № 7. С. 64–75.
7. Иванова Л. А., Голубева Н. С., Тимошук И. В., Горелкина А. К., Просеков А. Ю. и др. 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.

8. Красавцева Е. А., Максимов В. В., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Методы очистки сточных вод горнопромышленных предприятий от взвешенных веществ // ФТПРПИ. 2022. № 3. С. 136–146.
9. Mojiri A., Razmi E., Karimidermani B., Rezaia S., Kasmuri N. et al. Adsorption methods for arsenic removal in water bodies: a critical evaluation of effectiveness and limitations // *Frontiers in Water*. 2024. Vol. 6. DOI: 10.3389/frwa.2024.1301648
10. Шевцов М. Н., Войтов Е. Л., Колпакова В. П. Выбор оптимальной высоты напорного гидроциклона для очистки сточных вод горнодобывающих предприятий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 73–82.
11. Haris S. A., Dabagh S., Mollasalehi H., Ertas Y. N. Alginate coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles as nanocomposite adsorbents

for arsenic removal from aqueous solutions // *Separation and Purification Technology*. 2023. Vol. 310. ID 123193.

12. Zhang W., Miao A.-J., Wang N.-X., Li C., Sha J. et al. Arsenic bioaccumulation and biotransformation in aquatic organisms // *Environment International*. 2022. Vol. 163. ID 107221.
13. Zaimee M. Z. A., Sarjadi M. S., Rahman M. L. Heavy Metals Removal from Water by Efficient Adsorbents // *Water*. 2021. Vol. 13. Iss. 19. ID 2659.
14. Baigorria E., Cano L., Sapag K., Alvarez V. Removal efficiency of As(III) from aqueous solutions using natural and Fe(III) modified bentonites // *Environmental Technology*. 2022. Vol. 43. Iss. 24. P. 3728–3741.
15. Rofikoh V., Zaman B., Samadikun B. P. The Potential of Commercial Biomass-Based Activated Carbon to Remove Heavy Metals in Wastewater – A Review // *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 2023. Vol. 22. No. 1. P. 132–141.
16. Рябенкий В. С. Введение в вычислительную математику : учеб. пособие. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Физматлит, 2008. – 288 с. 

«GORNYI ZHURNAL», 2026, № 5, pp. 78–83  
DOI: 10.17580/gzh.2026.05.10

### Removal of As, Pb and Cd from mining wastewater to reduce environmental load: Adsorption and numerical modeling

#### Information about authors

F. V. Yusubov<sup>1</sup>, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences, Professor

A. N. Suleimanova-Rakhmanly<sup>2</sup>, Senior Lecturer, Suli\_ay@mail.ru

S. R. Namazova<sup>3</sup>, Lecturer

<sup>1</sup>Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup>Academy of the Ministry of Emergency Situations of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

<sup>3</sup>Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan

#### Abstract

Increasing anthropogenic impact and growth of environmental risks associated with mining activities escalates the need to introduce effective and sustainable wastewater treatment technologies. The aim of this study is to develop and optimize a method for removing toxic heavy metals—arsenic (As), lead (Pb) and cadmium (Cd)—from mine wastewater by adsorption using activated carbon.

Laboratory studies were conducted to study the influence of process parameters—pH of the medium, sorbent dose and contact time—on the efficiency of pollutant removal. Based on the obtained data, a mathematical model of mass transfer was constructed taking into account external (in the liquid phase) and internal (in the sorbent pores) diffusion, as well as isothermal adsorption. Verification of the model using experimental data demonstrated its high accuracy and applicability for engineering calculations.

The results of numerical modeling show that the initial stage of the process is limited by external diffusion, while at later stages internal diffusion becomes decisive. This allows more accurate prediction of the system behavior under various operating modes and on different scales.

The proposed approach can be used in design and optimization of local and industrial treatment plants adapted to variable composition of mine wastewater. Calculation of economic efficiency show that the use of activated carbon provides a high degree of purification at moderate operating costs, which makes the technology attractive for both developing and industrial countries. The developed technique has a high scalability potential and can be applied in international practice within the framework of sustainable water resources management.

**Keywords:** environmental safety, mining industry, wastewater treatment, heavy metals, activated carbon, mathematical modeling.

#### References

1. Razmakhnin K. K., Shumilova L. V., Razmakhnina I. B. Mining recirculated and waste water treatment using adsorbents made of zeolite-bearing rocks from the Khola Deposit. *Journal of Mining Science*. 2024. Vol. 60, No. 4. pp. 695–702.

2. Smirnov A. V., Smirnov V. N., Smirnov K. V. Purification of mine wastewater using natural sorbents in the conditions of stationary treatment facilities of metallurgy enterprises. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta*. 2024. No. 2(59). pp. 62–76.

3. Amen R., Bashir H., Bibi I., Shaheen S. M., Niazi N. K. et al. A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 396. ID 125195.

4. Yusubov F. V. The conditions of nonequilibrium adsorption of ions of heavy metals on zeolites. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2019. Vol. 41, No. 1. pp. 57–62.

5. Kulikova A. A., Stelmakhov A. A., Bacheva T. A., Tsybmal M. N. Treatment of water inflow from flooded underground mines. *MIAB*. 2020. No. 6. pp. 38–47.

6. Gorelkina A. K., Timoshchuk I. V., Golubeva N. S., Belyaeva O. V., Mikhaylova E. S. Reduction of impact of mining on water ecosystems. *MIAB*. 2023. No. 7. pp. 64–75.

7. Ivanova L. A., Golubeva N. S., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K., Prosekov A. Yu. et al. Evaluation of the efficiency of wastewater treatment of a coal mining enterprise and its impact on the pollution of small rivers. *Ecology and Industry of Russia*. 2023. Vol. 27, No. 1. pp. 60–65.

8. Krasavtseva E. A., Maksimova V. V., Makarov D. V., Masloboev V. A. Removal of suspended solids from industrial wastewater. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58, No. 3. pp. 466–475.

9. Mojiri A., Razmi E., Karimidermani B., Rezaia S., Kasmuri N. et al. Adsorption methods for arsenic removal in water bodies: A critical evaluation of effectiveness and limitations. *Frontiers in Water*. 2024. Vol. 6. DOI: 10.3389/frwa.2024.1301648

10. Shevtsov M. N., Voytov E. L., Kolpakova V. P. Choosing the optimal height of a pressurized hydrocyclone for wastewater treatment of mining enterprises. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta*. 2023. No. 1(54). pp. 73–82.

11. Haris S. A., Dabagh S., Mollasalehi H., Ertas Y. N. Alginate coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles as nanocomposite adsorbents for arsenic removal from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*. 2023. Vol. 310. ID 123193.

12. Zhang W., Miao A.-J., Wang N.-X., Li C., Sha J. et al. Arsenic bioaccumulation and biotransformation in aquatic organisms. *Environment International*. 2022. Vol. 163. ID 107221.

13. Zaimee M. Z. A., Sarjadi M. S., Rahman M. L. Heavy metals removal from water by efficient adsorbents. *Water*. 2021. Vol. 13, Iss. 19. ID 2659.

14. Baigorria E., Cano L., Sapag K., Alvarez V. Removal efficiency of As(III) from aqueous solutions using natural and Fe(III) modified bentonites. *Environmental Technology*. 2022. Vol. 43, Iss. 24. pp. 3728–3741.

15. Rofikoh V., Zaman B., Samadikun B. P. The potential of commercial biomass-based activated carbon to remove heavy metals in wastewater—A Review. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 2023. Vol. 22, No. 1. pp. 132–141.

16. Ryabenkiy V. S. The Introduction to Computational Mathematics : Tutorial. 3rd revised and enlarged edition. Moscow : Fizmatlit, 2008. 288 p.