



Кинетика сорбции фосфатов сорбентом из золошлаковых отходов

Т.Г. Короткова✉, А.М. Заколюкина, С.А. Бушумов

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация

Аннотация. Цель проведенного исследования заключалась в изучении кинетики сорбции фосфатов прокаленным сорбентом на основе золошлаковых отходов предприятия теплоэнергетики и апробации сорбента на открытом стоке в реку Кубань, содержащем ливневые и хозяйственно-бытовые сточные воды. Прокаленный сорбент получен высушиванием и прокаливанием при температуре 600 °С в течение 30 мин образцов золошлака Новочеркасской государственной районной электростанции. Приведены данные экспериментальных исследований статической сорбции по очистке от фосфатов модельных водных растворов и сточной воды. Исследована кинетика сорбции фосфатов из модельных растворов прокаленным сорбентом массой 1 г на 50 см³ раствора. Экспериментально определены оптимальные значения параметров сорбции: частота вращения перемешивающего устройства составляла 200 об/мин, pH был равен 7, продолжительность сорбции – от 10 до 120 мин. Исходная концентрация фосфатов в модельных растворах варьировалась от 2 до 300 мг/дм³. Наибольшая эффективность извлечения 97–98% получена для концентраций фосфатов в исходном растворе 10 и 20 мг/дм³. Экспериментальные данные обработаны по уравнениям кинетики псевдопервого порядка (Ладенбурга) и псевдовторого порядка (Хоскина и Маккея). Наибольший коэффициент детерминации $R^2 = 0,999$ получен по модели псевдовторого порядка, что согласуется с данными зарубежных исследователей по извлечению фосфатов из водных растворов сорбционным способом. Получено хорошее качественное и количественное согласование экспериментальных и расчетных значений эффективности извлечения фосфатов из водного раствора.

Ключевые слова: фосфаты, эффективность извлечения, кинетика сорбции, золошлаковые отходы предприятий теплоэнергетики

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/57 (грант Кубанского научного фонда, номер государственной регистрации 122101000007-2).

Для цитирования: Короткова Т.Г., Заколюкина А.М., Бушумов С.А. Кинетика сорбции фосфатов сорбентом из золошлаковых отходов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 3. С. 423–432. DOI: 10.21285/achb.989. EDN: ХУСНУМ.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Sorption kinetics of phosphates by a calcined sorbent from ash and slag waste

Tatyana G. Korotkova✉, Alina M. Zakolyukina, Svyatoslav A. Bushumov

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. This study investigates the sorption kinetics of phosphates onto a calcined sorbent derived from ash and slag waste generated by thermal power enterprises. The performance of the sorbent was also tested on water from an open discharge into the Kuban River, which contained a mixture of stormwater and domestic wastewater. The

sorbent was prepared by drying and calcining ash and slag samples from the Novocherkassk State District Power Plant at 600 °C for 30 minutes. This paper details experiments on the static sorption removal of phosphates from both model aqueous solutions and wastewater. In the kinetic studies using model solutions, a sorbent dose of 1 g per 50 cm³ of solution was used. The optimal sorption parameters were determined experimentally: an agitation speed of 200 rpm, a pH of 7, and a contact time ranging from 10 to 120 minutes, with initial phosphate concentrations ranging from 2 to 300 mg/L. A high removal efficiency of 97–98% was achieved at initial concentrations of 10 and 20 mg/L. The experimental data were analyzed using pseudo-first-order (Lagergren) and pseudo-second-order (Ho – McKay) kinetic models. The pseudo-second-order model provided the best fit, with a coefficient of determination R^2 of 0.999, which is consistent with literature on phosphate sorption from aqueous solutions. A strong agreement was observed between the experimental and calculated values for phosphate removal efficiency.

Key words: phosphates, removal efficiency, sorption kinetics, ash and slag waste from thermal power enterprises

Funding. The Kuban Science Foundation financially supported the research (scientific project MFI-20.1/57).

For citation: Korotkova T.G., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A. Sorption kinetics of phosphates by a calcined sorbent from ash and slag waste. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(3):423-432. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.989. EDN: XYCNM.

ВВЕДЕНИЕ

Попадание фосфатов со сточной водой в водный объект приводит к повышению численности опасных бактерий, «цветению» водоема, снижению биоразнообразия флоры и фауны. Повышение фосфатов в воде является одной из причин эвтрофикации, негативное воздействие которой на окружающую среду заключается в повышении мутности водоемов и гибели экосистемы [1–3]. Поскольку основное водоснабжение поступает из поверхностных вод, то это может привести к серьезным последствиям для людей [4].

Для очистки сточных вод от фосфатов применяют различные методы: химический (химическое осаждение или реагентная дефосфотация) [5–7], биологический (биологическая дефосфотация) [8–10], физико-химические (мембранная фильтрация [11], ионный обмен [12], обратный осмос [13]), электрохимический метод коагуляции [14, 15], физическую сорбцию [1, 16–23] и комбинированные методы [7]. Рассмотрим суть данных методов и опубликованные ранее результаты исследований некоторых коллег в данной области.

Широкое применение получили реагентные методы. Коагулянты (квасцы и хлорид кальция) добавляли при перемешивании в раствор фосфатов. Перемешивание осуществляли в два этапа: в течение 1 мин на частоте вращения 200 об/мин и в течение 30 мин при 30 об/мин. После периода отстаивания отбирали пробы на анализ. При одной и той же дозировке квасцы показали результат по удалению фосфора, который был в 2 раза лучше по сравнению с результатом применения хлорида кальция [5]. Соединения кальция, алюминия и железа применены в ходе исследования [6] в качестве реагентов-осадителей. Использование карбоната кальция позволило снизить содержание фосфатов с 14310 до 144 мг/л при pH воды 7,79 и расходе реагента 23016 мг/л при дальнейшем осаждении до 3,5 мг/л с помощью соединений железа и алюминия.

Биологическая дефосфотация основана на внутриклеточном накоплении полифосфатов протеобактериями, которые в настоящее время до конца не изучены [10].

Мембранная фильтрация предназначена в основном для доочистки хорошо очищенных сточных вод с помощью керамических мембран, которые получают из оксида алюминия, оксида титана, оксида циркония и т.д. Авторы работы [11] для получения гибридной керамической

мембраны порошкообразный активированный уголь в количестве 10% масс. добавляли в порошкообразный оксид алюминия (Al₂O₃), что позволило повысить пористость и площадь пор мембраны на 90% по сравнению с мембраной из немодифицированного оксида алюминия. Экспериментальные исследования показали удаление фосфатов от 40 до 99% в широком диапазоне концентраций растворенного вещества.

Изучено удаление фосфатов ионообменной смолой Amberlite IRA-67. Смола наиболее эффективна в диапазоне pH от 2 до 7 с максимальной поглощающей способностью 120,63 мг/г. Кинетика сорбции хорошо описывается моделью псевдоторгового порядка. Выявлено, что процесс сорбции протекает с выделением теплоты [12].

Для очистки воды от фосфатов применили кассеты с низконапорной мембраной обратного осмоса Filmtec TW30-1812-50. Установлено, что концентрация фосфатов в пермеате не превышает 2,5 мг/дм³ при исходной концентрации фосфатов 20 мг/дм³ и степени отбора пермеата до 90% [13].

Очистка сточных вод от фосфатов методом электрокоагуляции проведена в ходе подготовки работы [15]. В прямоугольный резервуар из плексигласа помещали вертикально четыре пластинчатых электрода (два анода и два катода). В качестве катода использовали перфорированные листы нержавеющей стали, а в качестве анода – алюминиевые пластины. Для повышения проводимости раствора использовали электролит с дозой от 0,5 до 5 г NaCl на 1 дм³. Исходная концентрация фосфатов составляла от 10 до 150 мг/дм³, pH – от 3 до 10, плотность тока – от 1,13 до 4,54 мА/см², продолжительность электрокоагуляции – до 180 мин. Максимальная эффективность удаления фосфатов достигалась при плотности тока 4,54 мА/см², pH 7 и дозе электролита 4–5 г NaCl на 1 дм³.

В настоящее время большое количество экспериментов проведено по сорбции фосфатов из водных растворов различными сорбентами. В работе [16] исследованы отходы производства, содержащие алюминий, железо, кальций и магний. Максимальная сорбционная емкость составила 70,8 мг PO₄³⁻/г для термообработанного доломита. Низкая сорбционная емкость была получена при исследовании мела, глины, трепела и осадка электрокоагуляционной очистки сточных вод.

Кукурузный початок, жом и древесный уголь использовались в качестве сорбентов для повышения эффективности удаления фосфатов на построенном искусственном водно-болотном угодье с вертикальным потоком. Сорбенты получали путем высушивания и измельчения до фракции размером менее 1 мм. Каолинит был выбран в качестве основания водно-болотного угодья в связи с его высокой сорбционной способностью по отношению к фосфатам. Анализ проб в течение 6 недель показал повышение эффективности очистки воды от фосфатов примерно на 6% при добавлении сорбентов [18].

В качестве дешевых сорбентов исследованы летучая зола и шлак, являющиеся золошлаковыми отходами электростанций [21–24]. Эффективность извлечения фосфатов составила при использовании шлака 96,15%, при использовании золы 96,9% [21]; добавление портландцемента к летучей золе и шлаку привело к снижению эффективности очистки воды от фосфатов [22]; максимальное значение эффективности извлечения фосфатов равнялось 83,8% [23]. В обзоре [24] рассмотрено применение отходов тепловой электростанции в качестве вторичных ресурсов для использования в промышленном секторе и сельском хозяйстве. Установлено, что золошлаковые отходы отвечают F-типу международной классификации ASTM C 618. Рекомендовано использовать золошлаковые отходы в качестве сорбентов для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод.

В ходе проведенных нами исследований был получен сорбент путем высушивания и прокаливания при 600 °С золошлаковых отходов Новочеркасской государственной районной электростанции (ГРЭС) (г. Новочеркасск, Ростовская область, Россия). Данный отход отвечает V классу опасности. Химический состав золошлака, отобранного на 3-й секции золоотвала Новочеркасской ГРЭС, составил, мг/кг: кадмий – менее 0,1; медь – 13,3±3,3; ртуть – менее 0,1; никель – менее 0,5; свинец – 6,4±1,6; цинк – менее 1,0; кобальт – менее 0,5; железо – 662±166; марганец – 450±113; мышьяк – менее 0,1; селен – менее 0,1; сурьма – менее 1,0; висмут – менее 1,0; кальций – 58300±14575; алюминий – 22,2±5,6. Содержание диоксида кремния составило 23,1%, влажность – 60,3%. Проведены исследования содержания различных форм металлов, в том числе подвижных и валовых. Сырье сорбента (золошлак) преимущественно содержит валовые формы металлов, что объясняется процессом его образования (взаимодействие с водой в ходе образования пульпы золошлакоудаления) и хранения на открытых полигонах (регулярное воздействие атмосферных осадков, вымывание водорастворимых и подвижных компонентов в нижние слои почвы). Это также подтверждается биотестированием водной вытяжки, которая не оказывает токсического воздействия на гидробионты, и результатами измерений массовой концентрации сухого остатка (минерализации) водной вытяжки. Доля уноса растворимой части сорбента составляет порядка 0,3%, что не оказывает значительного влияния на качество очищаемой воды [25]. Определены физико-химические показатели прокаленного сорбента: насыпная плотность – 0,666 г/см³, зольность – 99,5%, суммарный объем пор – 0,506 см³/г, истираемость – 8,5%, влажность – менее 1%. В результате гранулометрического анализа выявлено, что 95,2% массы

прокаленного сорбента приходится на фракцию от 0,25 до 0,5 мм [26]. Изучено адсорбционное равновесие при физической сорбции [27] и кинетика сорбции [28] в системе ионы аммония – прокаленный сорбент. Максимальное значение сорбционной емкости по ионам аммония по изотерме Ленгмюра составило порядка 1,1251 мг/г при дозе сорбента 1 г на 50 см³ раствора.

Цель текущей работы, в свою очередь, заключалась в экспериментальном исследовании кинетики сорбции фосфатов прокаленным сорбентом на основе золошлаковых отходов предприятия теплоэнергетики и апробации сорбента на открытом стоке в реку Кубань, содержащем ливневые и хозяйственно-бытовые сточные воды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом проведенного исследования являлся прокаленный сорбент на основе золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС, накопленных на золоотвале по схеме гидрозолоудаления. В ходе работ был применен спектрофотометрический метод исследований.

Методика приготовления исходных растворов, построение градуировочной характеристики и проведение серии экспериментальных исследований прокаленного сорбента приняты такими же, как по ионам аммония (подробно они изложены нами в работе [27]). Основной градуировочный раствор готовили на основе ГСО 7748-99 с аттестованным содержанием фосфат-ионов 1 г/дм³ и погрешностью ±1% при доверительной вероятности $P = 0,95$. Исходная концентрация фосфатов в модельных водных растворах составляла 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 300 мг/дм³. Содержание фосфатов рассчитывали по градуировочной зависимости от оптической плотности раствора. Измерение оптической плотности проводили на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (ООО «Экротех», Россия).

Сорбционную емкость (величину адсорбции) прокаленного сорбента A , мг/г, по отношению к фосфатам рассчитывали по уравнению, учитывающему поровый объем сорбента:

$$A = \frac{C_0 V - [C(V - v_p m)]}{m} = \frac{(C_0 - C)V}{m} + C v_p, \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация фосфатов в растворе, мг/дм³; C – текущая концентрация фосфатов в растворе после сорбции за определенный промежуток времени, мг/дм³; V – объем исходного раствора ($V = 0,05$ дм³); m – масса сорбента, г; v_p – удельный поровый объем прокаленного сорбента ($v_p = 0,506 \times 10^{-3}$ дм³/г).

Эффективность извлечения фосфатов E , %, определяли с учетом жидкости, задерживаемой объемом пор сорбента, по уравнению:

$$E = \frac{C_0 V - (V - v_p m) C}{C_0 V} \times 100 = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} + \frac{v_p m C}{C_0 V} \right) \times 100. \quad (2)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оптимизация pH раствора. Исследован раствор с содержанием фосфатов $C_0 = 20$ мг/дм³. Доза сорбента m принята равной 1 г на 50 см³ модельного раствора, время сорбции $t = 180$ мин, частота вращения магнитной мешалки $\nu = 200$ об/мин. Серия растворов с установленными значениями pH приготовлена по процедуре, изложенной в источнике [27]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оптимизация pH раствора

Table 1. Optimization of pH of the solution

pH	C, мг/дм ³	E, %	A, мг/г
4	11,0468	45,324	0,4539
5	3,8025	81,180	0,8113
6	1,8907	90,642	0,9064
7	0,5608	97,224	0,9716
8	0,5331	97,362	0,9739
9	0,9487	95,305	0,9532

Согласно данным табл. 1, максимальное значение сорбционной емкости *A* и эффективности очистки *E* достигнуто при pH, равном 7 и 8. В дальнейших исследованиях значение pH растворов принято равным 7.

Оптимизация частоты вращения магнитной мешалки. Исследован раствор с содержанием фосфатов $C_0 = 20$ мг/дм³. Доза сорбента *m* принята равной 1 г на 50 см³ модельного раствора, pH = 7, время сорбции *t* = 180 мин. Частота вращения магнитной мешалки ММ 2А (Laboratorni pristroje, Чехия) *v* варьировалась от 50 до 500 об/мин. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оптимизация частоты вращения магнитной мешалки

Table 2. Optimization of the rotation frequency of the magnetic stirrer

<i>v</i> , об/мин	C, мг/дм ³	E, %	A, мг/г
50	10,7004	47,039	0,4710
100	5,6439	72,066	0,7211
150	1,6275	91,945	0,9213
200	1,1149	94,482	0,9435
300	1,1288	94,413	0,9426
500	1,1149	94,482	0,9456

Согласно данным табл. 2, максимальное значение сорбционной емкости *A* и эффективности очистки *E* достигнуто при значении *v*, равном 200, 300 и 500 об/мин. В дальнейших исследованиях значение *v* принято равным 200 об/мин.

Оптимизация времени достижения равновесия. Исследован раствор с содержанием фосфатов $C_0 = 20$ мг/дм³. Доза сорбента *m* принята равной 1 г на 50 см³ модельного раствора, pH = 7. Частота вращения магнитной мешалки *v* = 200 об/мин. Время сорбции *t* варьировалось от 10 до 210 мин. Результаты приведены в табл. 3. Сделан вывод о достижении равновесия в течение 120 мин.

Таблица 3. Оптимизация времени достижения равновесия

Table 3. Optimization of the time to reach equilibrium

<i>t</i> , мин	C, мг/дм ³	E, %	A, мг/г
10	2,196	89,134	0,8895
30	1,503	92,562	0,9270
60	0,949	95,304	0,9549
90	0,588	97,087	0,9712
120	0,561	97,224	0,9742
150	0,561	97,224	0,9730
180	0,547	97,293	0,9717
210	0,561	97,224	0,9731

Влияние исходной концентрации фосфатов в растворе на величину адсорбции и эффективность извлечения фосфатов из раствора. Было приготовлено по 5 модельных растворов с содержанием C_0 фосфатов от 2 до 300 мг/дм³. Доза сорбента *m* принята равной порядка 1 г на 50 см³ модельного раствора, частота вращения перемешивающего устройства *v* = 200 об/мин, pH = 7, время сорбции *t* варьировалось от 10 до 120 мин. Результаты приведены в табл. 4.

С ростом начальной концентрации фосфатов в рас-

Таблица 4. Влияние исходной концентрации фосфатов в растворе на величину адсорбции и эффективность извлечения фосфатов из раствора (кинетика сорбции)

Table 4. Effect of the initial concentration of phosphates in the solution on the amount of adsorption and the efficiency of phosphate extraction from the solution (sorption kinetics)

<i>t</i> , мин	C, мг/дм ³	E, %	A, мг/г	C, мг/дм ³	E, %	A, мг/г
$C_0 = 2$ мг/дм ³				$C_0 = 50$ мг/дм ³		
10	0,625	69,080	0,06898	23,340	53,791	1,3464
30	0,378	81,285	0,08105	18,353	63,665	1,5916
60	0,190	90,609	0,09056	13,089	74,088	1,8505
90	0,143	92,941	0,09273	11,565	77,104	1,9266
120	0,145	92,803	0,09277	11,288	77,652	1,9446
$C_0 = 5$ мг/дм ³				$C_0 = 100$ мг/дм ³		
10	0,988	80,446	0,2013	57,658	42,924	2,1499
30	0,628	87,577	0,2193	48,307	52,183	2,6050
60	0,312	93,830	0,2348	41,380	59,039	2,9487
90	0,193	96,189	0,2405	39,302	61,096	3,0481
120	0,187	96,299	0,2405	38,956	61,439	3,0689
$C_0 = 10$ мг/дм ³				$C_0 = 200$ мг/дм ³		
10	0,723	92,847	0,4650	147,512	26,990	2,7011
30	0,487	95,178	0,4765	132,273	34,535	3,4435
60	0,293	97,098	0,4842	122,576	39,334	3,9255
90	0,261	97,418	0,4873	119,805	40,703	4,0748
120	0,242	97,601	0,4874	118,420	41,391	4,1300
$C_0 = 20$ мг/дм ³				$C_0 = 300$ мг/дм ³		
10	2,196	89,134	0,8895	242,381	20,022	3,0094
30	1,503	92,562	0,9270	228,527	24,597	3,6797
60	0,949	95,304	0,9549	217,444	28,252	4,2382
90	0,588	97,087	0,9712	214,674	29,167	4,3711
120	0,561	97,224	0,9742	214,674	29,167	4,3698

творе C_0 величина сорбционной емкости сорбента A возрастает, а эффективность их извлечения E из раствора сначала возрастает, затем понижается. Наибольшие значения E отмечены при C_0 , равной 10 и 20 мг/дм³.

Кинетические модели адсорбции. Экспериментальные данные по кинетике сорбции (см. табл. 4) опишем широко применяемыми кинетическими моделями [29]:

– псевдопервого порядка (уравнение Лагергрена):

$$A_t = A_e(1 - e^{-k_1 t}); \quad (3)$$

– псевдовторого порядка (уравнение Хо и Маккея):

$$A_t = \frac{A_e^2 k_2 t}{A_e k_2 t + 1}, \quad (4)$$

где A_t – значение сорбционной емкости в момент времени t , мг/г; A_e – равновесная величина адсорбции, мг/г; k_1 , k_2 – константы скорости адсорбции моделей псевдопервого и псевдовторого порядка.

Линеаризация уравнений (3)–(4) имеет следующий вид:

$$\ln(A_e - A_t) = \ln(A_e - k_1 t); \quad (5)$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{t}{A_e}. \quad (6)$$

В табл. 5 и 6 приведены значения параметров уравнений (3) и (4), полученные при обработке данных для исходных концентраций фосфатов C_0 в растворе 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 300 мг/дм³. Параметр A_e в модели псевдопервого порядка определен методом постепенного приближения, который был рассмотрен и применен нами в работе [28] при описании кинетики извлечения прокаленным сорбентом ионов аммония из раствора.

Таблица 5. Константы модели псевдопервого порядка (Лагергрена)

Table 5. Constants of the pseudo-first order (Lagergren model)

C_0 , мг/дм ³	A_e , мг/г	k_1 , мин ⁻¹	R^2
2	0,09277753	0,0779	0,9673
5	0,24050454	0,0959	0,8743
10	0,48740001	0,1225	0,8340
20	0,97420083	0,0941	0,7795
50	1,945265	0,0598	0,9382
100	3,06951	0,0639	0,9407
200	4,13159	0,0581	0,9251
300	4,37116	0,0832	0,7297

Примечание. Здесь и в табл. 6 R^2 – коэффициент детерминации.

В реальных бытовых сточных водах концентрация фосфатов может достигать 20 мг/дм³. В этом случае максимальное значение величины адсорбции составит порядка 1 мг фосфатов на 1 г прокаленного сорбента.

На рис. 1 и 2 приведена кинетика сорбции. Показано сравнение экспериментальных данных и расчетных зависимостей по моделям псевдопервого (см. рис. 1) и псевдовторого (см. рис. 2) порядков в виде зависимости величины адсорбции A , мг/дм³, от продолжительности сорбции t , мин. На рис. 1, а и 2, а зависимость $A = f(t)$ приведена для исходных концентраций фосфатов C_0 от 2 до 20 мг/дм³, а на рис. 1, б и 2, б – для исходных

Таблица 6. Константы модели псевдовторого порядка (Хо и Маккея)

Table 6. Constants of the pseudo-second order (Ho and McKay model)

C_0 , мг/дм ³	A_e , мг/г	k_2 , г/(мг×мин)	R^2
2	0,0967	2,2674	0,9996
5	0,2467	1,4064	0,9998
10	0,4903	2,9437	1,0000
20	0,9858	0,6569	0,9999
50	2,0559	0,0724	0,9991
100	3,2248	0,0533	0,9996
200	4,3725	0,0329	0,9997
300	4,6147	0,0360	0,9994

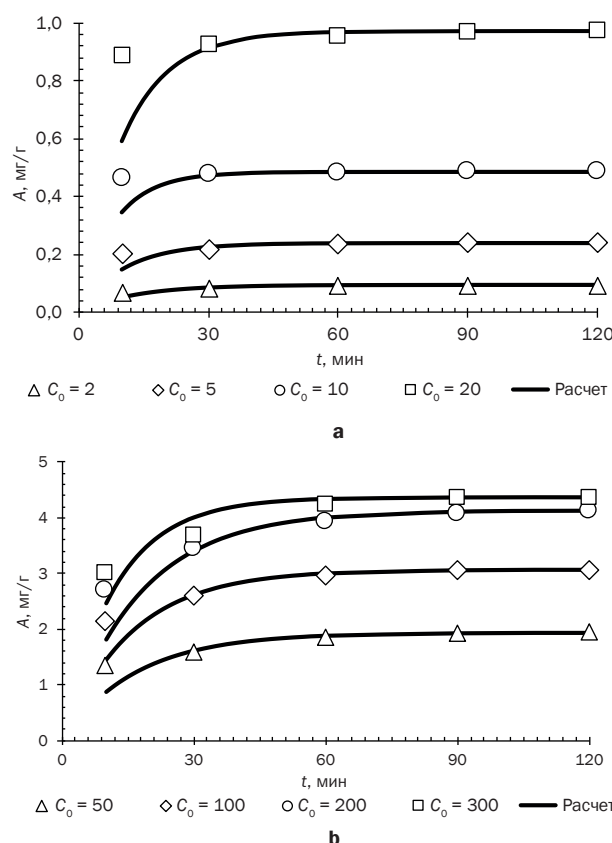


Рис. 1. Кривые кинетики псевдопервого порядка: а – при начальных концентрациях от 2 до 20 мг/дм³; б – при начальных концентрациях от 50 до 300 мг/дм³

Fig. 1. Pseudo-first order kinetic curves: а – $C_0 = 2$ –20 mg/L; б – $C_0 = 50$ –300 mg/L

концентраций фосфатов C_0 от 50 до 300 мг/дм³.

Лучшее согласование между расчетными и экспериментальными данными зависимости величины адсорбции A от продолжительности сорбции t получено по уравнению псевдовторого порядка для всех исходных концентраций фосфатов в растворе.

Для построения расчетной зависимости $E = f(C_0)$ по уравнению (2) предварительно вычислим концентрацию фосфатов в растворе C , мг/дм³, следующим образом. По уравнению псевдовторого порядка (4) рассчитаем величину адсорбции A , мг/г, для каждой исходной концентрации фосфатов в растворе C_0 , используя найденные константы,

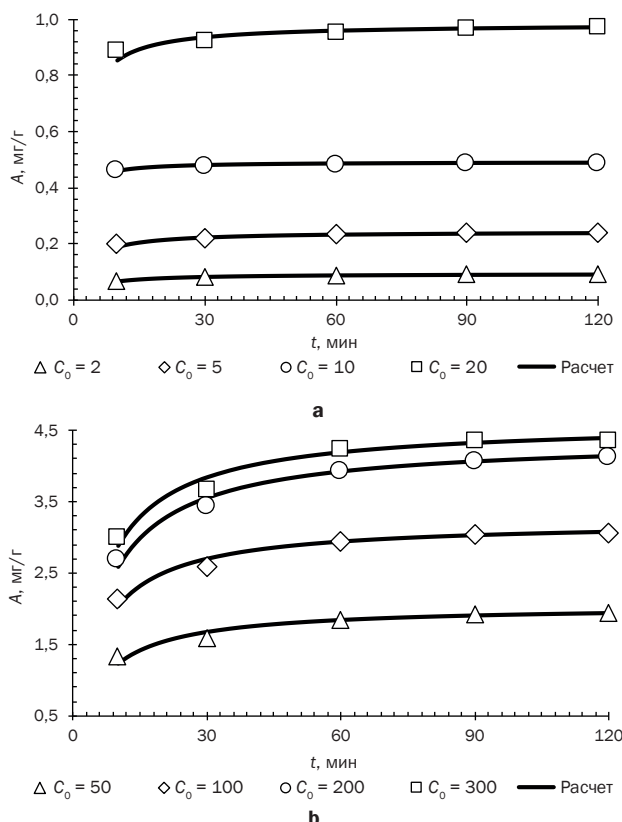


Рис. 2. Кривые кинетики псевдовторого порядка:
а – при начальных концентрациях от 2 до 20 мг/дм³;
б – при начальных концентрациях от 50 до 300 мг/дм³

Fig. 2. Pseudo-second order kinetic curves:
а – $C_0 = 2\text{--}20\text{ mg/L}$; б – $C_0 = 50\text{--}300\text{ mg/L}$

приведенные в табл. 6. Из уравнения (1) выразим значение концентрации фосфатов в растворе C после сорбции:

$$C = \frac{C_0 V - A m}{V - v_p m} \quad (7)$$

Расчетные значения C подставим в уравнение (2) и найдем расчетное значение эффективности извлечения E фосфатов из раствора. На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных и расчетных значений эффективности извлечения фосфатов из раствора. Качественное и количественное согласование наблюдается при всех экспериментальных значениях C_0 . Максимальные значения эффективности извлечения фосфатов приходятся на значения C_0 в диапазоне от 10 до 20 мг/дм³.

Аналогичная закономерность приведена в работе [30]. Твердые отходы роликовой печи, образующиеся на керамическом заводе (Египет), использованы в качестве сорбента. С ростом C_0 фосфат-ионов с 1,0 до 5,5 мг/дм³ эффективность адсорбции увеличилась с 94,5 до 99,97%. Дальнейшее увеличение C_0 фосфат-ионов с 5,5 до 13,0 г/дм³ привело к снижению эффективности удаления фосфат-ионов с 99,97 до 90,98% ($pH = 8$, $T = 25^\circ\text{C}$, $m = 3,5\text{ г/дм}^3$, $t = 50\text{ мин}$).

Исследование синтетического цеолита из летучей золы угольной электростанции в провинции Хубэй (Китай) для очистки сточных вод с высокой концентрацией фосфора также показало максимум эффективности

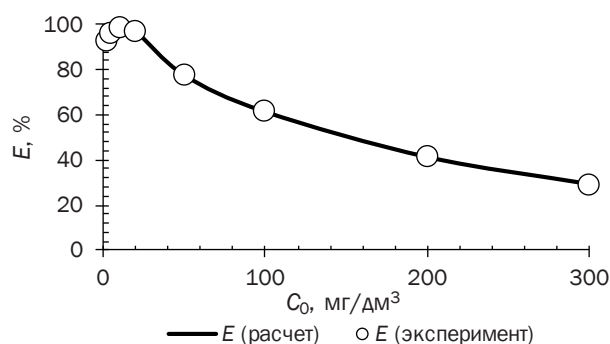


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных значений эффективности извлечения фосфатов из раствора

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of the efficiency of phosphate extraction from solution

извлечения фосфора при увеличении исходной концентрации фосфора в растворе [31].

Для определения эффективности извлечения фосфатов прокаленным сорбентом из реальной сточной воды проведены отборы образцов воды из открытого стока в р. Кубань, расположенного в районе Тургеневского моста г. Краснодар. Концентрация фосфатов в стоке составила 12,2 мг/дм³. Параметры статической сорбции были следующими: $t = 120\text{ мин}$, $v = 200\text{ об/мин}$, $pH = 7$, $T = 25 \pm 2^\circ\text{C}$. Результаты исследований приведены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты исследований статической сорбции (фазового равновесия) в системе фосфаты – прокаленный сорбент для реальной сточной воды

Table 7. Results of studies of static sorption (phase equilibrium) in the phosphate – calcined sorbent system for real wastewater

C_0 , мг/дм³	m , г	C_e , мг/дм³	A_e , мг/г	E , %
12,2	0,2004	7,099	1,2764	41,933
	0,4998	0,247	1,1959	97,986
	0,9999	0,145	0,6029	98,820
	2,0011	0,134	0,3015	98,921
	3,0002	0,126	0,2013	98,998
	4,9998	0,115	0,1209	99,106

В работе [32] приведены данные по фазовому равновесию в модельных растворах в системе фосфаты – прокаленный сорбент. При исходной концентрации фосфатов 10 мг/дм³ получены следующие результаты: при дозе прокаленного сорбента $m = 1,0013\text{ г}$ эффективность извлечения фосфатов $E = 97,601\%$; при $m = 2,002\text{ г}$ $E = 98,684\%$; при $m = 5,0013\text{ г}$ $E = 99,014\%$.

Сравнение эффективностей извлечения фосфатов в зависимости от дозы прокаленного сорбента для модельных растворов и сточной воды приведено на рис. 4. Кривая эффективности для сточной воды с концентрацией фосфатов 12,2 мг/дм³ расположена выше кривой эффективности для модельных растворов с концентрацией фосфатов 10 мг/дм³. Это объясняется тем, что, согласно экспериментальным данным табл. 4, при прочих равных условиях с увеличением исходной концентрации фосфатов увеличивается эффективность их извлечения.

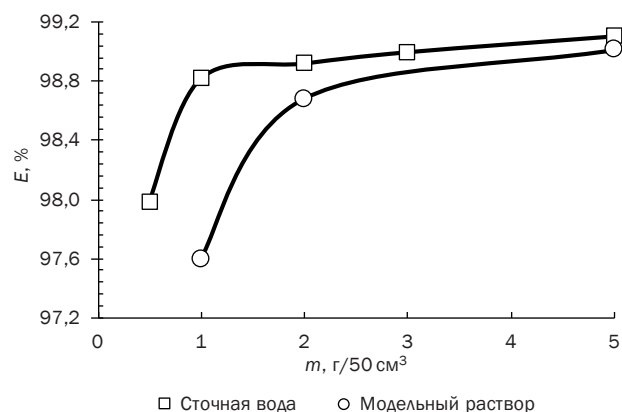


Рис. 4. Зависимость эффективности извлечения фосфатов от дозы прокаленного сорбента для модельных растворов при исходной концентрации 10 мг/дм³ и сточной воды при исходной концентрации 12,2 мг/дм³

Fig. 4. Dependence of the efficiency of phosphate extraction on the dose of calcined sorbent for model solutions with an initial concentration of 10 mg/L and wastewater with an initial concentration of 12.2 mg/L

Можно сделать вывод, что эффективность извлечения фосфатов из модельных растворов и сточной воды является достаточно высокой при дозах сорбента от 2 до 5 г на 50 см³ раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о применимости золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС в качестве сорбента для очистки водных растворов и сточных вод от фосфатов. Лучшее описание кинетики сорбции получено по уравнению псевдодвухго порядка по сравнению с уравнением псевдопервого порядка для всех исходных концентраций фосфатов 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 300 мг/дм³ в модельных растворах. Выявлен максимум эффективности извлечения фосфатов в диапазоне значений исходной концентрации фосфатов в растворе от 10 до 20 мг/дм³. Апробация прокаленного сорбента проведена на реальной сточной воде. Эффективность извлечения фосфатов из модельных растворов и реальной сточной воды является достаточно высокой и составляет 97–99% при дозах сорбента от 2 до 5 г на 50 см³ раствора. Полученные результаты согласуются с результатами зарубежных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fetene Y., Addis T. Adsorptive removal of phosphate from wastewater using Ethiopian rift pumice: batch experiment // *Air, Soil and Water Research*. 2020. Vol. 13. DOI: 10.1177/1178622120969658.
2. Chen Q., Ni Z., Wang S., Guo Y., Liu S. Climate change and human activities reduced the burial efficiency of nitrogen and phosphorus in sediment from Dianchi Lake, China // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274. P. 122839. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122839.
3. Ismail Z.Z. Kinetic study for phosphate removal from water by recycled date-palm wastes as agricultural by-products // *International Journal of Environmental Studies*. 2012. Vol. 69, no. 1. P. 135–149. DOI: 10.1080/00207233.2012.656975.
4. Radini S., Marinelli E., Akyol Ç., Eusebi A. L., Vasilaki V., Mancini A., et al. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations // *Applied Energy*. 2021. Vol. 298. P. 117268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117268.
5. Mohammed S.A.M., Shanshool H.A. Phosphorus removal from water and waste water by chemical precipitation using alum and calcium chloride // *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 10, no. 2. P. 47–52. DOI: 10.31699/IJCP.E.2009.2.7.
6. Плешаков Н.А., Беликов М.А., Сафарян С.А. Очистка воды от фосфат-ионов с применением различных реагентов // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия технические науки*. 2023. Т. 14. N 5. С. 60–66. DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.5.011. EDN: ZBIBTW.
7. Морозенко М.И., Никулина С.Н., Черняев С.И. Коагуляционная очистка сточных вод металлургического предприятия // *Фундаментальные исследования*. 2016. N 12-2. С. 318–323. EDN: XIISVV.
8. Appeldoorn K.J., Kortstee G.J.J., Zehnder A.J.B. Biological phosphate removal by activated sludge under defined conditions // *Water Research*. 1992. Vol. 26, no. 4. P. 453–460. DOI: 10.1016/0043-1354(92)90045-6.
9. Van Loosdrecht M.C.M., Hooijmans C.M., Brdjanovic D., Heijnen J.J. Biological phosphate removal processes // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1997. Vol. 48. P. 289–296. DOI: 10.1007/s002530051052.
10. Теплых С.Ю., Бочков Д.С., Базарова А.О. Перспективные методы биологического удаления фосфатов из сточной воды // *Градостроительство и архитектура*. 2021. Т. 11. N 2. С. 42–47. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.07. EDN: RJYJGW.
11. Manawi Y., Hussien M., Buekenhoudt A., Zekri A., Al-Sulaiti H., Lawler J., et al. New ceramic membrane for phosphate and oil removal // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 1. P. 106916. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106916.
12. Drissi R., Mouats C. Removal of phosphate by ion exchange resin: kinetic and thermodynamic study // *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 11, no. 3. P. 1126–1132. DOI: 10.31788/RJC.2018.1132081.
13. Gomelya M., Shabliy T., Radovenchik I., Vakulenko A. Determining the efficiency of reverse osmosis in the purification of water from phosphates // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24, no. 2. P. 238–246. DOI: 10.12911/22998993/157023.
14. Теплых С.Ю., Бочков Д.С., Базарова А.О. Исследование способов удаления фосфатов из бытовых сточных вод // *Градостроительство и архитектура*. 2020. Т. 10. N 4. С. 69–77. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.9. EDN: AWOOST.
15. Shalaby A., Nassef E., Mubark A., Hussein M. Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes // *American Journal of Environmental Engineering and Science*. 2014. Vol. 1, no. 5. P. 90–98.
16. Сапон Е.Г., Марцуль В.Н. Исследование очистки сточных вод от фосфатов материалами, полученными из природного сырья и отходов // *Труды БГТУ. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ*. 2015. N 3. С. 20–28. EDN: XAGJIX.

17. Loganathan P., Vigneswaran S., Kandasamy J., Bolan N.S. Removal and recovery of phosphate from water using sorption // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 44, no. 8. P. 847–907. DOI: 10.1080/10643389.2012.741311.

18. Danso F., Nartey E.K., Dowuona G.N.N., Darko D.A., Adjadeh T.A., Laryea K.B. Removal of phosphate from simulated domestic wastewater using sorbents under constructed wetland // *International Journal of Environment and Waste Management*. 2023. Vol. 32, no. 3. P. 273–285. DOI: 10.1504/IJEW.2023.133593.

19. Almanassra I.W., Kochkodan V., McKay G., Atieh M.A., Al-Ansari T. Review of phosphate removal from water by carbonaceous sorbents // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 287. P. 112245. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112245.

20. Chouyyok W., Wiacek R.J., Pattamakomsan K., Sangvanich T., Grudzien R.M., Fryxell G.E., et al. Phosphate removal by anion binding on functionalized nanoporous sorbents // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44, no. 8. P. 3073–3078. DOI: 10.1021/es100787m.

21. Ragheb S.M. Phosphate removal from aqueous solution using slag and fly ash // *HBRC Journal*. 2013. Vol. 9, no. 3. P. 270–275. DOI: 10.1016/j.hbrj.2013.08.005.

22. Agyei N.M., Strydom C.A., Potgieter J.H. The removal of phosphate ions from aqueous solution by fly ash, slag, ordinary Portland cement and related blends // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, no. 12. P. 1889–1897. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00888-8.

23. Hashim K.S., Ewadh H.M., Muhsin A.A., Zubaidi S.L., Kot P., Muradov M., et al. Phosphate removal from water using bottom ash: adsorption performance, coexisting anions and modelling studies // *Water Science & Technology*. 2021. Vol. 83, no. 1. P. 77–89. DOI: 10.2166/wst.2020.561.

24. Горбачева Т.Т., Майоров Д.В. Золошлаки ТЭЦ как сорбент для очистки сточных вод от ионов аммония // *Теплоэнергетика*. 2022. N 3. С. 72–79. DOI: 10.1134/S0040363622030043.

25. Korotkova T.G., Bushumov S.A., Ksandopulo S.Yu., Istoshina N.Yu. Determination of the hazard class of ash-and-slag from a thermal power plant accumulated on

ash dumps under the scheme hydraulic ash removal // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9, no. 10. P. 715–723. EDN: YLOQPR.

26. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Determination of physical and chemical properties of the modified sorbent from ash-and-slag waste accumulated on ash dumps by hydraulic ash removal // *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 1619–1626. DOI: 10.31788/RJC.2020.1335454.

27. Короткова Т.Г., Заколюкина А.М., Бушумов С.А. Исследование адсорбционного равновесия в системе ионы аммония – прокаленный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13. N 2. С. 291–303. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-2-291-303. EDN: CHSYDA.

28. Короткова Т.Г., Заколюкина А.М., Бушумов С.А. Применение моделей кинетики для исследования скорости сорбции в системе ионы аммония – прокаленный сорбент // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2024. Т. 14. N 1. С. 6–18. DOI: 10.21285/achb.894. EDN: ZDJFM.

29. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 390. P. 122156. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156.

30. Ali D.A., Abdelwahab W.A., Roushdy M.H. Optimum phosphate ion removal from aqueous solutions using roller kiln industrial solid waste // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 4027. DOI: 10.1038/s41598-024-53962-9.

31. Zhang K., van Dyk L., He D., Deng J., Liu S., Zhao H. Synthesis of zeolite from fly ash and its adsorption of phosphorus in wastewater // *Green Processing and Synthesis*. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 349–360. DOI: 10.1515/gps-2021-0032.

32. Korotkova T.G., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A. Removing phosphates from aqueous solutions by means of static sorption on ash-and-slag sorbent: analyzing coefficients of distribution based on adsorption isotherms // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024. Vol. 98. P. 1838–1851. DOI: 10.1134/S0036024424700924.

REFERENCES

1. Fetene Y., Addis T. Adsorptive removal of phosphate from wastewater using Ethiopian rift pumice: batch experiment. *Air, Soil and Water Research*. 2020;13. DOI: 10.1177/1178622120969658.

2. Chen Q., Ni Z., Wang S., Guo Y., Liu S. Climate change and human activities reduced the burial efficiency of nitrogen and phosphorus in sediment from Dianchi Lake, China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;274:122839. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122839.

3. Ismail Z.Z. Kinetic study for phosphate removal from water by recycled date-palm wastes as agricultural by-products. *International Journal of Environmental Studies*. 2012;69(1):135–149. DOI: 10.1080/00207233.2012.656975.

4. Radini S., Marinelli E., Akyol Ç., Eusebi A. L., Vasilaki V., Mancini A., et al. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations. *Applied Energy*. 2021;298:117268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117268.

5. Mohammed S.A.M., Shanshool H.A. Phosphorus removal from water and waste water by chemical

precipitation using alum and calcium chloride. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2009;10(2):47–52. DOI: 10.31699/IJCPE.2009.2.7.

6. Pleshakov N.A., Belikov M.L., Safaryan S.A. Water purification from phosphate ions using different reagents. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS*. 2023;14(5):60–66. (In Russian). DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.5.011. EDN: ZBIBTW.

7. Morozenko M.I., Nikulina S.N., Chernyaev S.I. Coagulative treatment of the waste waters of metallurgical factory. *Fundamental research*. 2016;12-2:318–323. (In Russian). EDN: XIISVV.

8. Appeldoorn K.J., Kortstee G.J.J., Zehnder A.J.B. Biological phosphate removal by activated sludge under defined conditions. *Water Research*. 1992;26(4):453–460. DOI: 10.1016/0043-1354(92)90045-6.

9. Van Loosdrecht M.C.M., Hooijmans C.M., Brdjanovic D., Heijnen J.J. Biological phosphate removal processes. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1997;48:289–296. DOI: 10.1007/s002530051052.

10. Teplyh S.Yu., Bochkov D.S., Bazarova A.O. Promising methods for biological removal of phosphates from wastewater. *Urban construction and architecture*. 2021;11(2):42-47. (In Russian). DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.07. EDN: RJYJGW.
11. Manawi Y., Hussien M., Buekenhoudt A., Zekri A., Al-Sulaiti H., Lawler J., et al. New ceramic membrane for phosphate and oil removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(1):106916. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106916.
12. Drissi R., Mouats C. Removal of phosphate by ion exchange resin: kinetic and thermodynamic study. *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2018;11(3):1126-1132. DOI: 10.31788/RJC.2018.1132081.
13. Gomelya M., Shabliy T., Radovenchyk I., Vakulenko A. Determining the efficiency of reverse osmosis in the purification of water from phosphates. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(2):238-246. DOI: 10.12911/22998993/157023.
14. Teplyh S.Yu., Bochkov D.S., Bazarova A.O. Investigation of methods for removal of phosphates from household waste water. *Urban construction and architecture*. 2020;10(4):69-77. (In Russian). DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.9. EDN: AWOOST.
15. Shalaby A., Nassef E., Mubark A., Hussein M. Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. *American Journal of Environmental Engineering and Science*. 2014;1(5):90-98.
16. Sapon Ye.G., Martsul V.N. Phosphates purification of waste water by natural materials and industrial wastes (comparative study). *Trudy BGTU. Seriya 3. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv*. 2015;3:20-28. (In Russian). EDN: XAGJIX.
17. Loganathan P., Vigneswaran S., Kandasamy J., Bolan N.S. Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014;44(8):847-907. DOI: 10.1080/10643389.2012.741311.
18. Danso F., Nartey E.K., Dowuona G.N.N., Darko D.A., Adjadeh T.A., Laryea K.B. Removal of phosphate from simulated domestic wastewater using sorbents under constructed wetland. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2023;32(3):273-285. DOI: 10.1504/IJEW.2023.133593.
19. Almanassra I.W., Kochkodan V., McKay G., Atieh M.A., Al-Ansari T. Review of phosphate removal from water by carbonaceous sorbents. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:112245. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112245.
20. Chouyyok W., Wiacek R.J., Pattamakomsan K., Sangvanich T., Grudzien R.M., Fryxell G.E., et al. Phosphate removal by anion binding on functionalized nanoporous sorbents. *Environmental Science & Technology*. 2010;44(8):3073-3078. DOI: 10.1021/es100787m.
21. Ragheb S.M. Phosphate removal from aqueous solution using slag and fly ash. *HBRC Journal*. 2013;9(3):270-275. DOI: 10.1016/j.hbrj.2013.08.005.
22. Agyei N.M., Strydom C.A., Potgieter J.H. The removal of phosphate ions from aqueous solution by fly ash, slag, ordinary Portland cement and related blends. *Cement and Concrete Research*. 2002;32(12):1889-1897. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00888-8.
23. Hashim K.S., Ewadh H.M., Muhsin A.A., Zubaidi S.L., Kot P., Muradov M., et al. Phosphate removal from water using bottom ash: adsorption performance, coexisting anions and modelling studies. *Water Science & Technology*. 2021;83(1):77-89. DOI: 10.2166/wst.2020.561.
24. Gorbacheva T.T., Mayorov D.V. TPP ashes as a sorbent for waste water purification from ammonium ions. *Teploenergetika*. 2022;3:72-79. (In Russian). DOI: 10.1134/S0040363622030043.
25. Korotkova T.G., Bushumov S.A., Ksandopulo S.Yu., Istoshina N.Yu. Determination of the hazard class of ash-and-slag from a thermal power plant accumulated on ash dumps under the scheme hydraulic ash removal. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(10):715-723. EDN: YLOQPR.
26. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Determination of physical and chemical properties of the modified sorbent from ash-and-slag waste accumulated on ash dumps by hydraulic ash removal. *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2020;13(3):1619-1626. DOI: 10.31788/RJC.2020.1335454.
27. Korotkova T.G., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A. Investigation of adsorption equilibrium in the system of ammonium ions and a calcined sorbent from ash and slag waste of thermal power plants. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):291-303. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-2-291-303. EDN: CHSYDA.
28. Korotkova G.T., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A. Application of kinetic models to study the sorption rate in the 'ammonium ions – calcined sorbent' system. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(1):6-18. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.894. EDN: ZDJIFM.
29. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;390:122156. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156.
30. Ali D.A., Abdelwahab W.A., Roushdy M.H. Optimum phosphate ion removal from aqueous solutions using roller kiln industrial solid waste. *Scientific Reports*. 2024;14:4027. DOI: 10.1038/s41598-024-53962-9.
31. Zhang K., van Dyk L., He D., Deng J., Liu S., Zhao H. Synthesis of zeolite from fly ash and its adsorption of phosphorus in wastewater. *Green Processing and Synthesis*. 2021;10(1):349-360. DOI: 10.1515/gps-2021-0032.
32. Korotkova T.G., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A. Removing phosphates from aqueous solutions by means of static sorption on ash-and-slag sorbent: analyzing coefficients of distribution based on adsorption isotherms. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024;98:1838-1851. DOI: 10.1134/S0036024424700924.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Короткова Татьяна Германовна,

д.т.н., доцент, профессор,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Российская Федерация,
✉ korotkova1964@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9278-871X>

Заколюкина Алина Маратовна,

младший научный сотрудник,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Российская Федерация,
Zakolyukina_AM@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9879-531X>

Бушумов Святослав Андреевич,

младший научный сотрудник,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Российская Федерация,
bushumov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7227-0614>

Вклад авторов

Т.Г. Короткова – разработка концепции,
научное руководство, получение
финансирования, редактирование рукописи.
А.М. Заколюкина – проведение исследования,
написание черновика рукописи.
С.А. Бушумов – разработка методологии,
проведение исследования, написание
черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.02.2025.
Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята к публикации 01.09.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana G. Korotkova,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar, 350072,
Russian Federation,
✉ korotkova1964@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9278-871X>

Alina M. Zakolyukina,

Junior Researcher,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar, 350072,
Russian Federation,
Zakolyukina_AM@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9879-531X>

Svyatoslav A. Bushumov,

Junior Researcher,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar, 350072,
Russian Federation,
bushumov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7227-0614>

Contribution of the authors

Tatyana G. Korotkova – conceptualization,
supervision, funding acquisition, editing.
Alina M. Zakolyukina – investigation,
writing – original draft.
Svyatoslav A. Bushumov – methodology,
investigation, writing – original draft.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 11.02.2025.
Approved after reviewing 12.05.2025.
Accepted for publication 01.09.2025.