

Научная статья  
УДК 544.723.21

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-142-151>



## Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов прокаленным сорбентом из золошлаковых отходов теплоэнергетики

Т.Г. Короткова✉, С.А. Бушумов

Кубанский государственный технологический университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация

**Аннотация.** Выполнены экспериментальные исследования динамической сорбции модельных смесей, содержащих нефтепродукты. В качестве сорбента исследованы высушенные и прокаленные золошлаковые отходы, накопленные методом гидрозолоудаления на золоотвале Новочеркасской ГРЭС (г. Новочеркасск, Ростовская область, Россия). Навеска прокаленного сорбента для каждого модельного раствора являлась фиксированной и составляла 5,0 г. Модельные растворы пропускали через колонку, заполненную прокаленным сорбентом. На первом этапе проведены экспериментальные исследования по оптимизации расхода фильтрата в диапазоне от 0,05 до 2,5 дм<sup>3</sup>/мин с шагом 0,05 дм<sup>3</sup>/мин. Через колонку, содержащую 5 г прокаленного сорбента, пропускали модельные водные растворы с водородным показателем рН=7,5, содержащие по 100 мг/дм<sup>3</sup> нефтепродуктов. Оптимальный расход фильтрата составил 0,1 дм<sup>3</sup>/мин при максимальной эффективности извлечения нефтепродуктов из раствора 84%. На втором этапе построены кинетические зависимости сорбционной емкости и концентрации нефтепродуктов в фильтрате. Для этого проведены экспериментальные исследования по насыщению сорбента нефтепродуктами путем пропускания порций модельного водного раствора, содержащего 10000 мг/дм<sup>3</sup> по 0,05 дм<sup>3</sup>, через колонку, заполненную прокаленным сорбентом в количестве 5 г, с отбором фильтрата 0,1 дм<sup>3</sup>/мин. Максимальное значение сорбционной емкости составило 560 мг/г при эффективности извлечения нефтепродуктов из раствора 85%. На основе анализа результатов экспериментальных исследований предложен подход к математическому описанию кинетики сорбции нефтепродуктов. Вычисление концентрации нефтепродуктов в фильтрате разбито на два этапа. На первом этапе повышение концентрации нефтепродуктов в фильтрате происходит при насыщении сорбента нефтепродуктами до максимального значения сорбционной емкости, на втором – при максимальном значении сорбционной емкости. Приведены уравнения кинетики для расчета сорбционной емкости и концентрации нефтепродуктов в фильтрате. Получено хорошее качественное согласование экспериментальных и расчетных данных.

**Ключевые слова:** золошлак, теплоэнергетика, нефтепродукты, сорбент, кинетика сорбции, математическое описание кинетики сорбции

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/57 (грант КНФ).

**Для цитирования:** Короткова Т.Г., Бушумов С.А. Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов прокаленным сорбентом из золошлаковых отходов теплоэнергетики // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 1. С. 142–151. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-142-151>.

### CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

## Kinetic curves of oil products sorption by calcined sorbent from ash and slag wastes of thermal power engineering

Tatyana G. Korotkova✉, Svyatoslav A. Bushumov

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

**Abstract.** Experimental research into dynamic sorption of model mixtures containing oil products was carried out. As a sorbent, dried and calcined ash and slag wastes accumulated by hydraulic ash removal at the ash disposal site of Novocherkassk State District Power Plant (Novocherkassk, Rostov Oblast, Russia) were investigated. The weighted portion of calcined sorbent for each model solution was fixed and amounted to 5.0 g. Model solutions were passed through a column filled with calcined sorbent. At the first stage, investigations were carried out to optimize the filtrate flow rate in the range from 0.05 to 2.5 dm<sup>3</sup>/min in increments of 0.05 dm<sup>3</sup>/min. Model aqueous solutions with pH=7.5 and containing 100 mg/dm<sup>3</sup> of oil products were passed through the column containing 5 g of calcined sorbent. The optimum filtrate flow rate was 0.1 dm<sup>3</sup>/min at a maximum efficiency of oil products extraction from the solution of 84%. At the second stage, kinetic dependencies of sorption capacity and oil product concentration in the

© Короткова Т.Г., Бушумов С.А., 2023

filtrate were plotted. To this end, experimental investigations into sorbent saturation with oil products by means of passing portions of model aqueous solution containing  $10,000 \text{ mg/dm}^3$  by  $0.05 \text{ dm}^3$  through the column filled with calcined sorbent in a quantity of 5 g and a filtrate withdrawal rate of  $0.1 \text{ dm}^3/\text{min}$  were performed. The maximum value of sorption capacity was found to comprise  $560 \text{ mg/g}$  under the efficiency of oil products extraction from the solution of 85%. Following an analysis of the obtained experimental results, an approach to the mathematical description of the kinetics of oil products sorption was proposed. According to this approach, the concentration of oil products in the filtrate is calculated in two stages. At the first stage, the increase in the concentration of oil products in the filtrate occurs when the sorbent is saturated with oil products up to the maximum value of its sorption capacity. At the second stage, this increase is observed at the maximum value of sorption capacity. Kinetic equations for calculating sorption capacity and the concentration of oil products in the filtrate are provided. A satisfactory qualitative agreement between the experimental and calculated data was obtained.

**Keywords:** ash and slag, heat power engineering, oil products, sorbent, sorption kinetics, mathematical description of sorption kinetics

**Funding.** The research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project MFI-20.1/57.

**For citation:** Korotkova T.G., Bushumov S.A. Kinetic curves of oil products sorption by calcined sorbent from ash and slag wastes of thermal power engineering. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(1):142-151. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-142-151>.

## ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации золошлакоотвалы занимают огромные территории. На ТЭС, ТЭЦ и ГРЭС при использовании каменного угля образуются летучая зола (зола уноса) и твердые шлаковые отходы. Накопленные по схеме гидрозолоудаления золошлаковые отходы (ЗШО) приводят не только к отчуждению территории, но и оказывают негативное воздействие на окружающую среду и жилые районы, расположенные вблизи теплоэлектростанций [1, 2]. Проблемы и перспективы утилизации ЗШО ТЭЦ освещены в исследовании [2].

Применяемые в практике очистки сточных вод активированные угли относятся к дорогостоящим сорбентам. ЗШО являются дешевыми, негорючими и невзрывоопасными. Проведенные нами исследования показали, что полученные по схеме гидрозолоудаления ЗШО имеют 5 класс опасности [3], что согласуется с результатами, изложенными в работе [4]. Одним из направлений исследований утилизации ЗШО является изучение их сорбционных свойств по отношению к различным компонентам для очистки воды.

В работе [5] авторы применяли образцы золошлака, полученного на установке по сжиганию угля в Корею, в качестве сорбента для очистки воды от свинца. Образцы золошлака исследовали на фракционный состав, а также изучали количественный химический состав каждой фракции. Для 3-х фракций золошлака (первая – размер частиц менее 1,19 мм, вторая – размер частиц от 1,19 до 2,00 мм и третья – размер частиц от 2,00 до 4,75 мм) исследовали зависимость содержания свинца в образцах сорбента от времени контакта с водным раствором, содержащим свинец. В результате образец сорбента с более мелкой фракцией насыщался свинцом за период времени порядка 1500 мин, в то время как образец с более крупной фракцией имел максимум насыщения при времени контакта порядка 4500 мин. Содержание свинца в образцах сорбента имело максимальное значение около 0,05 мг/г. Для описания механизма адсорбции применили уравнение Елович. Изотермы равновесия

представлены в виде уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радужкевича. Получено хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных.

Индонезийские ученые также подтверждают наличие сорбционных свойств золы уноса от сжигания угля, образованной в городе Моджосонг провинции Центральная Ява, в качестве составной части сорбента для очистки вод от свинца [6]. Образцы сорбента получали путем смешения в разных пропорциях золы уноса и природных цеолитов. Исследовали сорбционные свойства образцов сорбента на растворах с содержанием свинца, которое варьировали от 2 до 12 ppm, путем перемешивания в течение различного времени при pH от 1 до 6 ед. Наиболее выражены сорбционные свойства (сорбционная емкость 0,5433 мг/г) у образца сорбента, в состав которого входит зола уноса и природных цеолитов в массовом соотношении 75:25. Оптимальное значение pH раствора для сорбции составило 5 ед., при этом сорбционная емкость образца достигла 0,567 мг/г. Наиболее оптимальным временем контакта является 60 мин, при этом сорбционная емкость составила 0,577 мг/г. На основе экспериментальных данных построены изотермы Ленгмюра и Фрейндлиха, значения коэффициентов аппроксимации – 0,9661 и 0,8873 соответственно. По теории Ленгмюра определили значение предельной насыщаемости сорбента, равное 0,983 мг/г.

В исследовании [7] авторы применяли летучую золу (золу уноса) с известным химическим составом в качестве сорбента для очистки воды от ионов никеля. Фракционный анализ показал, что 91,12% частиц сорбента имеют размер менее 75 мкм. Для исследований использовали модельный раствор исходного состава ионов никеля с массовой концентрацией  $500 \text{ mg/dm}^3$  в бидистиллированной воде. Анализ на содержание ионов никеля осуществляли методом атомно-абсорбционного анализа с пламенной атомизацией. Одна серия экспериментов проведена в условиях перемешивания при 150 об/мин с применением раствора ионов никеля с массовой концентрацией  $20 \text{ mg/dm}^3$  при постоянном количестве (дозе)

сорбента из расчета 10 г на 100 см<sup>3</sup> раствора. Степень извлечения ионов никеля при времени контакта свыше 175 мин достигала порядка 40%. Экспериментальные данные представлены с использованием кинетики моделей псевдопервого и псевдодвотого порядка и модели внутримолекулярной диффузии. Экспериментальные данные о процессе адсорбции согласуются с теоретическими. Обнаружено, что кинетическая модель псевдодвотого порядка описывает процесс сорбции с высоким коэффициентом корреляции ( $R_2 = 0,998$ ) лучше, чем другие кинетические модели. Сорбционная емкость ионов Ni<sup>2+</sup> при равновесии составила 0,0714 мг/г.

Китайские ученые исследовали летучую золу электростанции в городе Нанкин для очистки сточных вод от ионов меди [8]. Образцы сорбента готовили путем смешения в различных пропорциях золы уноса, стального шлака, активированного белого клея (алюмосиликатный клей) и связующего агента (кремне-содержащий отвердитель 525R), получили 4 группы образцов сорбента с различным составом. Изучили сорбционные свойства каждой группы образцов по результатам взаимодействия сорбента с модельным раствором, содержащим ионы меди в концентрации 100 мг/дм<sup>3</sup>. Наиболее эффективным (степень извлечения ионов меди составила 81,52%) оказался образец, содержащий золу уноса, стальной шлак, активированный белый клей и связующий агент в массовом соотношении 6:1:2:1. Установили оптимальное значение дозы сорбента массой, равной 5 г на 150 см<sup>3</sup> очищаемой воды. Исследовали кинетику сорбции при температурах раствора 15, 25 и 35 °С, для описания которой применили уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха. Для обеих моделей значение коэффициента аппроксимации превышало 0,95, что говорит о согласованности практических данных с теорией. На основе экспериментальных исследований определили термодинамические параметры сорбции.

Сорбционные свойства летучей золы, полученной на электростанции, расположенной в городе Мехильонес (Чили), подтверждены чилийскими и канадскими исследователями [9]. Степень извлечения ионов меди составила 66%. Построена изотерма Фрейндлиха, характеризующаяся линейной зависимостью со значением коэффициента аппроксимации, равным 0,93734, что свидетельствует о согласовании теории и экспериментальных данных.

Исследователи [10] применяли золошлак (лигнит от сжигания бурого угля) и летучую золу в качестве сорбента для очистки воды от фосфатов. Сорбцию проводили на модельных растворах, содержащих фосфаты, путем взаимодействия в течение 24 ч образцов, порцию которых рассчитывали из соотношения масс твердого образца и жидкости 1:10. Степень извлечения фосфатов варьировалась от 0,1 до 7% и от 17 до 27% для образцов золы уноса и лигнита соответственно. По влиянию pH раствора сделан вывод о наличии взаимосвязи между pH раствора и способностью образца удерживать фосфаты. Оптимальным в процессе сорбции определено значение pH около 2.

Индийские ученые [11] через фильтр с золой уноса пропускали образец сточной воды со значением биохимического потребления кислорода (БПК)

178 мг/дм<sup>3</sup> и химического потребления кислорода (ХПК) 110 мг/дм<sup>3</sup>. После очистки значения содержания БПК и ХПК в фильтрате составили 96 и 40 мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

В работе [12] приведены исследования фильтрующей установки с тремя слоями фильтрационного материала. Толщина среднего слоя золы уноса составляла 10, 20, 30 и 40 мм, заключенного между слоями гальки (нижний слой) и песка (верхний слой) толщиной по 40 мм. Изучали зависимость степени очистки сточных вод от толщины слоя золы уноса в фильтрующей установке. Пропускали сточную воду с массовой концентрацией взвешенных веществ 3500 мг/дм<sup>3</sup>, сухого остатка 2000 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК 300 мг/дм<sup>3</sup>, растворенного кислорода 2,75 мг/дм<sup>3</sup> и значением pH, равным 7,58. Наиболее эффективным оказался слой с толщиной золы уноса, равной 10 мм. Значения массовых концентраций исследуемых показателей в фильтрате после очистки сточной воды составили: взвешенные вещества – 80, сухой остаток – 700 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – 80 мг/дм<sup>3</sup>, растворенный кислород – 12 мг/дм<sup>3</sup> и 5,6 ед. pH водородного показателя.

Золошлак и летучую золу от сжигания угля, собранные в промышленной зоне Тан Тао г. Хошимин (Вьетнам), применили в качестве сорбента для извлечения метиленового синего из водного раствора [13]. Образцы сорбента с размером частиц порядка 245 мкм высушивали при температуре 105 °С в течение 24 ч. Высушенные образцы модифицировали растворами силиката натрия и гидроксида натрия в различном массовом соотношении. Модельные растворы содержали метиленовый синий в концентрации 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Растворы перемешивали с модифицированным сорбентом в течение различного времени и определяли степень извлечения метиленового синего. Авторам удалось достигнуть степени извлечения метиленового синего из раствора порядка 36% при времени контакта 180 мин.

Сорбцию летучей золой от сжигания угля, образованной на ТЭС в городе Бокаро (штат Джхаркханд, Индия), проводили на модельных растворах, содержащих красители кристаллический фиолетовый и розанилина гидрохлорид, путем взаимодействия образцов сорбента массой 1,0 г с 50 см<sup>3</sup> раствора, содержащего от 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-4</sup> моль/дм<sup>3</sup> красителя, при перемешивании в конических колбах объемом 100 см<sup>3</sup>. Оптимальное значение pH раствора, содержащего розанилина гидрохлорид, экспериментально определено как 6,0 и 8,0 ед. pH для раствора, содержащего кристаллический фиолетовый. На следующем этапе изучали процесс сорбции в зависимости от температуры растворов в термостате с установленными постоянными значениями температуры 10, 25 и 40 °С. На основе экспериментальных данных построена зависимость равновесной концентрации красителей от времени контакта, описываемая законом Лагергрена [14].

В Казанском государственном энергетическом университете проведен лабораторный эксперимент, воспроизводящий работу азротенка-смесителя и вторичного отстойника, в котором биологическая очистка совмещена с адсорбционной. В качестве адсорбента использовали высушенный карбонатный шлам ТЭС.

Результаты анализа очищенной воды показали снижение ХПК в среднем на 91%, БПК<sub>5</sub> – на 98%, аммонийного азота – на 94% при дозе шлама 0,6 мг/дм<sup>3</sup> с размером фракции от 0,09 мм до 0,50 мм [15].

Очистка бытовых сточных вод при использовании в качестве сорбента летучей золы проведена в исследованиях [16, 17]. Результаты экспериментов показали значительное снижение значения БПК с 385 до 45–55 мг/л, ХПК с 680 до 110–150 мг/л, рН с 8,4 до 6,9 и общего содержания растворенных веществ с 715 до 250–300 мг/л после обработки сорбентом [17].

Таким образом, применение золошлака и летучей золы в качестве сорбента для очистки воды подтверждено многочисленными исследованиями ученых различных стран мира.

Нами не обнаружены публикации по исследованию ЗШО теплоэнергетики в качестве сорбента для очистки сточных вод от нефтепродуктов (НП). В связи с этим цель работы заключалась в проведении экспериментальных исследований по насыщению НП прокаленного сорбента из ЗШО теплоэнергетики, построении кинетических кривых сорбции НП и математическом описании кинетики сорбции НП.

Стандартные методы решения известных кинетических моделей адсорбции приведены в работах [18, 19].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Объект исследования.** Золошлак, накопленный по схеме гидрозолоудаления, отобранный с 3-й секции золоотвала Новочеркасской ГРЭС (г. Новочеркасск, Ростовская область). Навеску золошлака гомогенизировали и выдерживали в сушильном шкафу при температуре 110 °С в течение 30 мин. Высушенную навеску комкообразной формы прокаливали в муфельной печи при температуре 600 °С в течение 30 мин. Получали сыпучий материал, названный прокаленным сорбентом. Исследования физико-химических свойств прокаленного сорбента приведены нами в работе [20]: насыпная плотность – 0,666 г/см<sup>3</sup>, зольность – менее 5 млн<sup>-1</sup>, суммарный объем пор – 0,506 см<sup>3</sup>/г, истираемость – 8,5%, влажность – менее 1%. На основе гранулометрического анализа определено, что фракция от 0,25 до 0,5 мм составляет 95,2% от массы прокаленного сорбента.

**Оборудование.** Для просушивания реактивов и образцов, подготовки лабораторной посуды использовали шкаф сушильный серии LOIP LF-60/350-GG1 (ЗАО «Лабораторное оборудование и приборы», Россия), поддерживающий температурный режим от 50 до 350 °С, аттестованный на рабочую температуру (105,0±1,0) °С. Прокаливание образцов проводили в электропечи лабораторной (муфельной печи) LM-312.11 (Veb Elektro Bad Frankenhauzen, Германия), поддерживающей температурный режим от 50 до 1200 °С. Оптимизацию скорости фильтрации осуществляли с помощью установки вакуумного фильтрации с регулируемой глубиной вакуума.

**Концентрирование.** Все эксперименты проводились в динамических условиях при комнатной температуре. Содержание НП в отобранных пробах определяли на концентратометре КН-3 (ООО «Производствен-

но-экологическое предприятие «СИБЭКОПРИБОР», Россия). Для этого в соответствии с ПНДФ 14.1:2:4.5-95 (издание 2011 г.) проводили экстракцию НП из водных растворов на экстракционной вращательной установке ES-8000 (ООО «Экохим», Россия).

Содержание НП в пробах  $X$ , мг/дм<sup>3</sup>, рассчитывали по выражению:

$$X = \frac{C_{\text{изм}} \cdot B \cdot K}{V}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{изм}}$  – измеренное количество НП в экстракте, мг/дм<sup>3</sup>;  $B$  – объем элюата, дм<sup>3</sup> (равен 0,030 дм<sup>3</sup>);  $K$  – коэффициент разбавления элюата;  $V$  – объем пробы раствора, взятой на анализ, дм<sup>3</sup>.

Сорбционную емкость прокаленного сорбента  $A$ , мг/г, (величину избыточной гиббсовской адсорбции) по отношению к НП рассчитывали по уравнению:

$$A = \frac{(C_0 - C_k)V}{m}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация НП в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_k$  – концентрация НП в фильтрате после сорбции (конечная), мг/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем пропускаемого через колонку раствора, дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса сорбента в колонке, г.

Скорость фильтрования, см<sup>3</sup>/(см<sup>2</sup>·мин), определяли как отношение расхода фильтрата, см<sup>3</sup>/мин, к площади поперечного сечения колонки, см<sup>2</sup>, диаметром 1,25 см.

Продолжительность сорбции, мин, вычисляли путем отношения объема раствора, дм<sup>3</sup>, к расходу фильтрата, дм<sup>3</sup>/мин.

Эффективность извлечения НП  $E$ , %, определяли по выражению:

$$E = \frac{C_0 - C_k}{C_0} \cdot 100. \quad (3)$$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оптимизации скорости фильтрования очищаемой воды через прокаленный сорбент было приготовлено 5 модельных водных растворов с водородным показателем рН=7,5, содержащих по 100 мг/дм<sup>3</sup> НП. Результаты определения оптимального значения рН при динамической сорбции прокаленного сорбента изложены нами в работе [21]. В виалу вместимостью 8 см<sup>3</sup> с завинчивающейся крышкой вносили 2,70 см<sup>3</sup> изооктана х.ч., 2,40 см<sup>3</sup> гексадекана х.ч. и 1,40 см<sup>3</sup> бензола х.ч., закрывали виалу крышкой и перемешивали смесь путем встряхивания. Таким образом получили смесь НП, содержащую изооктан, гексадекан и бензол в массовом соотношении 3:3:2. Навеску полученной смеси массой 0,1000 г (100,0 мг) переносили в мерную колбу вместимостью 1,0 дм<sup>3</sup> с дистиллированной водой объемом около 0,9 дм<sup>3</sup> и доводили значение рН раствора до 7,5 ед. путем внесения раствора 0,01 моль/дм<sup>3</sup> гидроксида натрия. Смесь диспергировали путем интенсивного встряхивания в течение 15 мин, доводили объем раствора до метки на колбе дистиллированной водой и тщательно перемешивали. Полученный раствор содержал НП в концентрации 100 мг/дм<sup>3</sup>.

Таблица 1. Оптимизация расхода фильтрата

Table 1. Filtrate flow optimization

Экспериментальные данные		Расчетные данные			
Расход фильтрата, дм <sup>3</sup> /мин	Концентрация нефтепродуктов в фильтрате, мг/дм <sup>3</sup>	Продолжительность фильтрования, мин	Скорость фильтрования, см <sup>3</sup> /(см <sup>2</sup> ·мин)	Динамическая емкость, мг/г	Эффективность извлечения, %
0,05	16	20,00	40,76	16,8	84,04
0,10	16	10,00	81,53	16,8	84,04
0,15	16	6,67	122,29	16,8	84,04
0,20	17	5,00	163,06	16,6	83,04
0,25	22	4,00	203,82	15,6	78,06

Примечание. Объем исходного раствора – 1 дм<sup>3</sup>; концентрация нефтепродуктов в исходном растворе – 100 мг/дм<sup>3</sup>; удельный поровый объем прокаленного сорбента – 0,506 см<sup>3</sup>/г; масса прокаленного сорбента – 5 г.

Состав модельного раствора НП соответствует требованиям п. Б 1 Приложения Б ПНД Ф 14.1:2:4.5-95. Такой же состав по соотношению веществ имеет ГСО 7248-96, применяемый для градуировки концентратомера при определении концентрации НП.

Приготовленные растворы были отфильтрованы через стеклянную хроматографическую колонку с закрепленным в ней слоем прокаленного сорбента массой 5,0 г на вакуумной установке с регулируемой глубиной вакуума при поддержании постоянного расхода фильтрата. Расход фильтрата исследовали в диапазоне от 0,05 до 2,5 дм<sup>3</sup>/мин с шагом 0,05 дм<sup>3</sup>/мин. Экспериментальные данные оптимизации расхода фильтрата приведены в табл. 1.

Кривая зависимости концентрации НП в фильтрате от расхода фильтрата приведена на рис. 1. Оптимальный расход фильтрата составил от 0,15 до 0,20 дм<sup>3</sup>/мин, свыше 0,20 дм<sup>3</sup>/мин концентрация НП в фильтрате резко возросла.



Рис. 1. Зависимость концентрации нефтепродуктов в фильтрате от расхода фильтрата

Fig. 1. Relationship between the oil products concentration in the filtrate on the flow rate of the filtrate

Зависимость динамической емкости от продолжительности фильтрования приведена на рис. 2. Насыщение сорбента НП достигается при 6–7 мин фильтрования, при этом динамическая емкость составляет 16,8 мг/г.

На рис. 3 приведены кривые зависимости концентрации НП в фильтрате и эффективности извлечения НП от продолжительности фильтрования. Насыщение сорбента НП достигается при 6–7 мин фильтрования, максимальная эффективность извлечения НП составляет 84%.

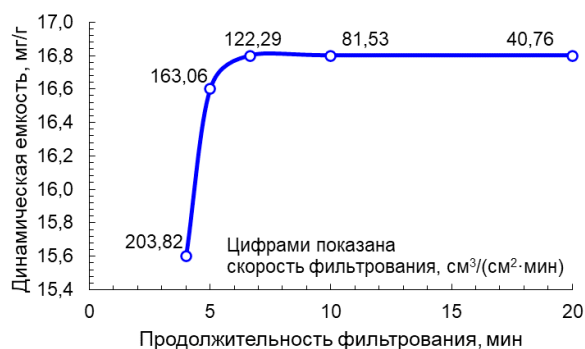


Рис. 2. Зависимость динамической емкости от продолжительности фильтрования

Fig. 2. Relationship between the dynamic capacity and the duration of filtration

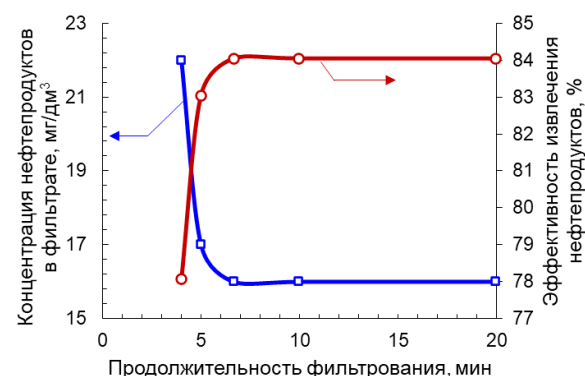
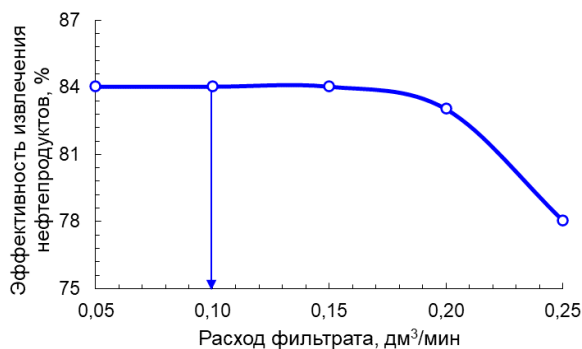


Рис. 3. Зависимость концентрации нефтепродуктов в фильтрате и эффективности извлечения нефтепродуктов от продолжительности фильтрования

Fig. 3. Relationship between the oil products concentration in the filtrate, the extraction efficiency and the duration of filtration



**Рис. 4.** Зависимость эффективности извлечения нефтепродуктов от расхода фильтрата  
**Fig. 4.** Relationship between the extraction efficiency of oil products and filtrate consumption

Анализ изменения эффективности извлечения от расхода фильтрата (рис. 4) и результатов исследований, приведенных на рис. 1–3, показал, что для насыщения прокаленного сорбента НП оптимальным является расход фильтрата  $0,1 \text{ dm}^3/\text{мин}$ .

Для построения кинетических зависимостей изменения сорбционной емкости и концентрации НП в фильтрате от продолжительности сорбции НП сорбентом приготовили серию модельных растворов. Навеску смеси изооктана, гексадекана и бензола с массовым соотношением 3:3:2 массой  $0,5000 \text{ г}$  ( $500,0 \text{ мг}$ ) переносили в мерную колбу вместимостью  $50 \text{ см}^3$  с дистиллированной водой объемом около  $40 \text{ см}^3$  и доводили значение pH раствора до 7,5 ед. путем внесения раствора  $0,01 \text{ моль}/\text{dm}^3$  гидроксида натрия. Смесь диспергировали путем интенсивного встряхивания в течение 15 мин, довели объем раствора до метки на колбе дистиллированной водой и тщательно перемешивали. Полученный раствор содержал НП в концентрации  $10000 \text{ мг}/\text{dm}^3$ . Модельные растворы объемом по  $50 \text{ см}^3$  ( $0,050 \text{ dm}^3$ ) последовательно пропускали через колонку, заполненную прокаленным сорбентом в количестве  $5,0 \text{ г}$ , с расходом фильтрата  $0,1 \text{ dm}^3/\text{мин}$ . Полученный фильтрат собирали в стеклянную кол-

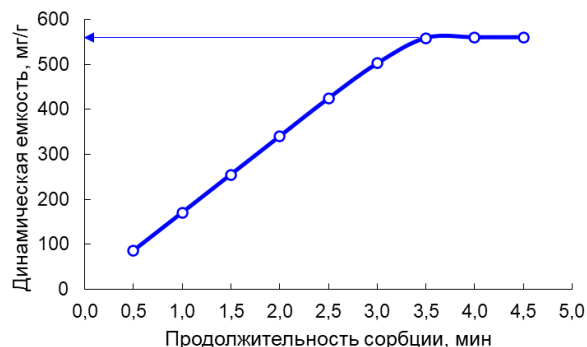
**Таблица 2.** Изменение сорбционной емкости и концентрации нефтепродуктов в фильтрате от продолжительности сорбции нефтепродуктов сорбентом

**Table 2.** Changes in the sorption capacity and oil products concentration in the filtrate depending on the duration of oil products sorption

Объем исходного раствора, $\text{dm}^3$	Концентрация нефтепродуктов в фильтрате, $\text{мг}/\text{dm}^3$	Динамическая емкость, $\text{мг}/\text{г}$	Продолжительность сорбции, мин	Эффективность извлечения, %
0,05	1468	85,32	0,50	86,06
0,10	1500	170,00	1,00	85,38
0,15	1508	254,76	1,50	85,17
0,20	1509	339,64	2,00	85,10
0,25	1517	424,15	2,50	84,98
0,30	1635	501,90	3,00	83,79
0,35	2021	558,53	3,50	79,94
0,40	3001	559,92	4,00	70,18
0,45	3778	559,98	4,50	62,43

*Примечание.* Концентрация нефтепродуктов в исходном растворе –  $10000 \text{ мг}/\text{dm}^3$ ; удельный поровый объем прокаленного сорбента –  $0,506 \text{ см}^3/\text{г}$ ; масса прокаленного сорбента –  $5 \text{ г}$ ; расход фильтрата –  $0,1 \text{ dm}^3/\text{мин}$ .

бу с притертой крышкой вместимостью  $100 \text{ см}^3$ . После окончания фильтрования каждой порции на концентратометре КН-3 (ООО «Производственно-экологическое предприятие «СИБЭКОПРИБОР», Россия) определяли концентрацию НП в полученном фильтрате. Результаты исследований приведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Изменение динамической емкости от продолжительности сорбции

**Fig. 5.** Dynamic capacity versus the duration of sorption

На рис. 5 приведено изменение динамической емкости от продолжительности сорбции. При объеме исходного раствора от  $0,5$  до  $3,5 \text{ dm}^3$  наблюдается линейная зависимость вплоть до максимального значения сорбционной емкости прокаленного сорбента, равного  $560 \text{ мг}/\text{г}$ .

Изменение эффективности извлечения НП от динамической емкости приведено на рис. 6. При значении сорбционной емкости  $560 \text{ мг}/\text{г}$  эффективность извлечения НП из раствора составляет  $85\%$ . При дальнейшем насыщении прокаленного сорбента НП эффективность извлечения по НП резко падает.

Рассмотрим математическое описание процесса сорбции НП.

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 5, 6) показывает, что сорбционная емкость сорбента до-

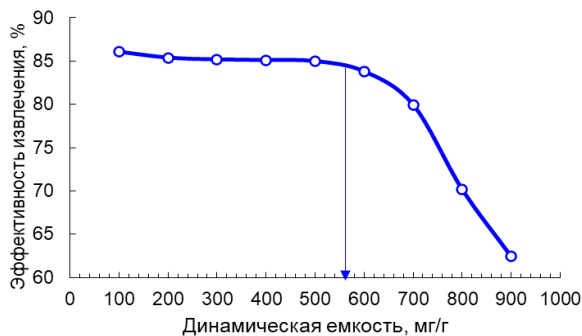


Рис. 6. Зависимость эффективности извлечения нефтепродуктов от динамической емкости сорбента

Fig. 6. Relationship between the oil products extraction efficiency and the dynamic capacity of the sorbent

стигает своего максимального значения в интервале от 3 до 3,5 мин, причем от 0,5 до 3 мин резко возрастает практически по линейному закону. Очевидно, что при дальнейшем проведении сорбции с исходной концентрацией НП в растворе 10000 мг/дм<sup>3</sup> при постоянном расходе фильтрата 0,1 дм<sup>3</sup>/мин сорбционная емкость прокаленного сорбента будет оставаться постоянной, равной 560 мг/г, а концентрация НП в фильтрате начнет резко возрастать и стремиться к величине исходной концентрации, т.е. к 10000 мг/дм<sup>3</sup>.

Определим время сорбции  $\tau^*$ , при котором сорбционная емкость становится равной максимальной  $A_{max} = 560$  мг/г. Для этого найдем среднее значение концентрации НП в фильтрате в диапазоне от 1468 до 1635 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 2), которое составило  $C_k^* = 1523$  мг/дм<sup>3</sup>. Уравнение (2) для расчета величины адсорбции запишем в виде

$$A_{max} = (C_0 - C_k^*) \frac{Q\tau^*}{m}, \quad (4)$$

где  $V = Q\tau^*$  ( $Q = 0,1$  дм<sup>3</sup>/мин – расход фильтрата,  $m = 5$  г – масса сорбента).

Тогда время сорбции составляет  $\tau^* = 3,303$  мин:

$$\tau^* = \frac{A_{max}m}{(C_0 - C_k^*)Q}. \quad (5)$$

Это означает, что после времени сорбции, равной 3,303 мин, концентрация НП в фильтрате будет определяться по выражению:

$$C_k = C_0 - \frac{A_{max}m}{Q\tau}. \quad (6)$$

Положение экспериментальных точек (см. рис. 5) соответствует изотерме Ленгмюра. Определение постоянных коэффициентов изотермы Ленгмюра путем линеаризации экспериментальных данных в координатах привело к значительной расходимости между экспериментальными и расчетными данными:

$$\frac{C_k}{A} = f(C_k). \quad (7)$$

В этой связи обработку экспериментальных данных проведем следующим образом. В качестве уравнения аппроксимации примем нелинейную зависимость, подобную изотерме Ленгмюра

$$A = \frac{aC_k}{1 + bC_k}, \quad (8)$$

где  $a$  и  $b$  – искомые коэффициенты.

Поиск коэффициентов  $a$  и  $b$  проведем по двум точкам:  $A = 85,32$  мг/г,  $C_k = 1468$  мг/дм<sup>3</sup> (см. табл. 2) и  $A = 560$  мг/г,  $C_k = 1523$  мг/дм<sup>3</sup>. Два уравнения с двумя неизвестными решены аналитически, получены следующие значения искомых коэффициентов:  $a = 0,0025$ ;  $b = -0,0006521$ .

Найдем зависимость концентрации НП в фильтрате от времени  $C_k = f(\tau)$ . Для этого решим совместно два уравнения

$$\begin{cases} A = \frac{aC_k}{1 + bC_k}; \\ A = (C_0 - C_k) \frac{Q\tau}{m} \end{cases} \quad (9)$$

Получим

$$dC_k^2 + fC_k - e = 0 \quad (10)$$

$$C_k = \frac{-f \mp \sqrt{f^2 - 4de}}{2d} \quad (11)$$

где

$$d = \frac{bQ}{m}\tau; \quad f = a + \frac{Q}{m}\tau - bC_0\frac{Q}{m}\tau; \quad e = -C_0\frac{Q}{m}\tau.$$

Полученное уравнение (11) имеет два корня. Если в числителе знак «минус», то полученные значения  $C_k$  значительно превышают  $C_0$  (параметр  $d$  является отрицательной величиной), что противоречит физике процесса сорбции, и, следовательно, не подлежат учету. При знаке «плюс» в числителе получены адекватные значения  $C_k$ .

Уравнение (11) позволяет рассчитать концентрацию НП в фильтрате  $C_k$  от 0 до  $\tau^*$ , а уравнение (6) – при дальнейшей продолжительности сорбции. Сорбционную емкость  $A$  прокаленного сорбента по НП можно вычислить по уравнению (9) для временного интервала сорбции от 0 до  $\tau^*$ , при дальнейшей сорбции  $A = A_{max}$ . Уравнения (6), (9), (11) представляют собой математическое описание кинетики сорбции НП прокаленным сорбентом для режима постоянной скорости фильтрования.

Сопоставление экспериментальных данных и расчетных графических зависимостей изменения концентрации НП в фильтрате и сорбционной емкости от продолжительности сорбции приведено на рис. 7 и 8.

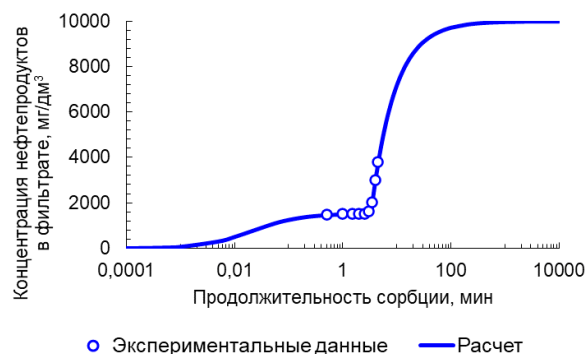


Рис. 7. Зависимость концентрации нефтепродуктов в фильтрате от продолжительности сорбции

Fig. 7. Relationship between the oil products concentration in the filtrate and the duration of sorption

Продолжительность сорбции отложена по оси абсцисс в логарифмической системе координат.

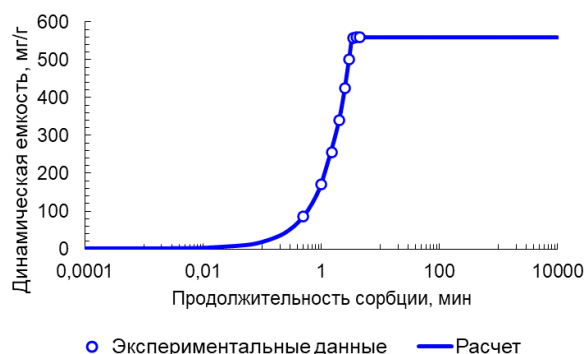


Рис. 8. Изменение динамической емкости от продолжительности сорбции

Fig. 8. Dynamic capacity versus the duration of sorption

Получено хорошее качественное согласование экспериментальных данных и расчетных зависимостей на основе предложенного подхода к математическому описанию кинетики сорбции НП прокаленным сорбентом.

### ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов экспериментальных исследований по насыщению сорбента НП при динамической сорбции предложен подход к математическому описанию кинетики сорбции НП. Вычисление концентрации НП в фильтрате разбито на два этапа. На первом этапе повышение концентрации НП в фильтрате происходит при насыщении сорбента НП до максимального значения сорбционной емкости, на втором – при максимальном значении сорбционной емкости. Приведены уравнения кинетики для расчета сорбционной емкости и концентрации НП в фильтрате. Получено хорошее качественное согласование экспериментальных и расчетных данных.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черенцова А.А., Олесик С.М. Оценка золошлаковых отходов как источник загрязнения окружающей среды и как источник вторичного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. N S3. С. 230–243.
2. Подгорецкий Г.С., Горбунов В.Г., Агапов Е.А., Ерохов Т.В., Козлова О.Н. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. N 6. С. 439–446. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-6-439-446>.
3. 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.
4. Черенцова А.А. Эколого-технологическая оценка состава и свойств золошлаковых отходов (на примере Хабаровской ТЭЦ-3) // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. N 5. С. 1733–1736.
5. Gorme J.B., Maniquiz M.C., Kim S.S., Son Y.G., Kim Y.-T., Kim L.-H. Characterization of bottom ash as an adsorbent of lead from aqueous solutions // Environmental Engineering Research. 2010. Vol. 15, no. 4. P. 207–213. <https://doi.org/10.4491/eer.2010.15.4.207>.
6. Pranoto, Martini T., Sunardi B.M.W., Anandita E.P. Optimization of the use of fly ash and natural zeolite activated as composite for an adsorbent of lead heavy metal (Pb) // Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 578. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/578/1/012022>.
7. Agarwal A.K., Kadu M.S., Pandhurnekar C.P., Muthreja I.L. Kinetics study on the adsorption of Ni<sup>2+</sup> ions onto fly ash // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2015. Vol. 50, no. 5. P. 601–605.
8. Liu Y., Chen Q., Singh R.P. Low-cost RSAC and adsorption characteristics in the removal of copper ions from wastewater // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 11. P. 5612. <https://doi.org/10.3390/app12115612>.
9. Pizarro J., Castillo X., Jara S., Ortiz C., Navarro P., Cid H., et al. Adsorption of Cu<sup>2+</sup> on coal fly ash modified with functionalized mesoporous silica // Fuel. 2015. Vol. 156. P. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.030>.
10. Kirk D.W., Jia C.Q., Yan J., Torrenueva A.L. Wastewater remediation using coal ash // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2003. Vol. 5, no. 1. P. 0005–0008. <https://doi.org/10.1007/s101630300001>.
11. Arun A., Varunraj D., Sutharsan T., Bhoopesh T., Rajan M.S. Domestic wastewater treatment using fly ash // International Journal of Research in Engineering, Science and Management. 2021. Vol. 4, no. 5. P. 184–186.
12. Ganapathy C., Nivetha K., Kumar K.O., Pratheep T. Wastewater treatment using fly ash // International Research Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 5, no. 2. P. 680–683.
13. Nguyen K.D., My Q.N.V., Kim A.P.T., Tran P.T., Kim D.H.T., Kim O.L.T. Coal fly ash-slag and slag-based geopolymer as an adsorbent for the removal of methylene blue in wastewater // Science & Technology Development Journal. 2022. Vol. 25, no. 1. P. 2215–2223. <https://doi.org/10.32508/stdj.v25i1.3421>.
14. Mohan D., Singh K.P., Singh G., Kumar K. Removal of dyes from wastewater using flyash, a low-cost adsorbent // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2002. Vol. 41, no. 15. P. 3688–3695. <https://doi.org/10.1021/ie010667+>.
15. Николаева Л.А., Лаптев А.Г., Исхакова Р.Я. Повышение эффективности биологической очистки сточных вод на предприятиях химической промышленности // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. N 2. С. 196–202. <https://doi.org/10.7868/S0321059618020098>.
16. Singh P., Tripathi P., Chauhan S., Mishra A. Domestic waste water treatment using fly ash alone or in combined form // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2016. Vol. 11, no. 3. P. 34–39. <https://doi.org/10.9790/1676-1103033439>.
17. Saravanakumar P., Gopalakrishnan P., Sivaka-



middevi M., Archana E.S. Domestic wastewater treatment using flyash as adsorbent // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. Vol. 8, no. 5. P. 1465–1468.

18. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 390. P. 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.

19. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.

20. 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 // *Rasayan Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13, no. 3. P. 1619–1626. <https://doi.org/10.31788/RJC.2020.1335454>.

21. Korotkova T.G., Bushumov S.A., Ksandopulo S.Yu., Solonnikova N.V. Studying the efficiency of treatment model mixtures of petroleum products with the modified sorbent made of ash-and-slag during dynamic sorption // *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20, no. 11. P. 202–209. <https://doi.org/10.12911/22998993/113582>.

## REFERENCES

1. Cherencova A.A., Olesik S.M. Evaluation of ash waste as a source of pollution and a source of secondary raw materials. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2013;(S3):230-243. (In Russian).

2. Podgorodetskiy G.S., Gorbunov V.B., Agapov E.A., Erokhov T.V., Kozlova O.N. Processing ash and slag wastes from thermal power stations. Part 1. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(6):439-446. (In Russian). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-6-439-446>.

3. 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.

4. Cherentsova A.A. Ecological and technological evaluation of composition and properties of ash waste (for example, Khabarovsk heat and power). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskii nauki*. 2014;19(5):1733-1736. (In Russian).

5. Gorme J.B., Maniquiz M.C., Kim S.S., Son Y.G., Kim Y.-T., Kim L.-H. Characterization of bottom ash as an adsorbent of lead from aqueous solutions. *Environmental Engineering Research*. 2010;15(4):207-213. <https://doi.org/10.4491/eer.2010.15.4.207>.

6. Pranoto, Martini T., Sunardi B.M.W., Anandita E.P. Optimization of the use of fly ash and natural zeolite activated as composite for an adsorbent of lead heavy metal (Pb). *Materials Science and Engineering*. 2019;578:012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/578/1/012022>.

7. Agarwal A.K., Kadu M.S., Pandhurnekar C.P., Muthreja I.L. Kinetics study on the adsorption of Ni<sup>2+</sup> ions onto fly ash. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015;50(5):601-605.

8. Liu Y., Chen Q., Singh R.P. Low-cost RSAC and adsorption characteristics in the removal of copper ions from wastewater. *Applied Sciences*. 2022;12(11):5612. <https://doi.org/10.3390/app12115612>.

9. Pizarro J., Castillo X., Jara S., Ortiz C., Navarro P., Cid H., et al. Adsorption of Cu<sup>2+</sup> on coal fly ash modified with functionalized mesoporous silica. *Fuel*. 2015;156:96-102. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.030>.

10. Kirk D.W., Jia C.Q., Yan J., Torrenueva A.L. Wastewater remediation using coal ash. *Journal of Material*

*Cycles and Waste Management*. 2003;5(1):0005-0008. <https://doi.org/10.1007/s101630300001>.

11. Arun A., Varunnraj D., Sutharsan T., Bhoopesh T., Rajan M.S. Domestic wastewater treatment using fly ash. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2021;4(5):184-186.

12. Ganapathy C., Nivetha K., Kumar K.O., Pratheep T. Wastewater treatment using fly ash. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018;5(2):680-683.

13. Nguyen K.D., My Q.N.V., Kim A.P.T., Tran P.T., Kim D.H.T., Kim O.L.T. Coal fly ash-slag and slag-based geopolymer as an adsorbent for the removal of methylene blue in wastewater. *Science & Technology Development Journal*. 2022;25(1):2215-2223. <https://doi.org/10.32508/stdj.v25i1.3421>.

14. Mohan D., Singh K.P., Singh G., Kumar K. Removal of dyes from wastewater using flyash, a low-cost adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002;41(15):3688-3695. <https://doi.org/10.1021/ie010667+>.

15. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Iskhakova R.Y. Improving the efficiency of wastewater biological treatment at chemical plants. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2018;45(2):196-202. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0321059618020098>.

16. Singh P., Tripathi P., Chauhan S., Mishra A. Domestic waste water treatment using fly ash alone or in combined form. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2016;11(3):34-39. <https://doi.org/10.9790/1676-1103033439>.

17. Saravanakumar P., Gopalakrishnan P., Sivakamidevi M., Archana E.S. Domestic wastewater treatment using flyash as adsorbent. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019;8(5):1465-1468.

18. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving method. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;390:122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.

19. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Ленинград: Химия; 1982. 168 с. (In Russian).

20. 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. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2020;13(3):1619-1626. <https://doi.org/10.31788/RJC.2020.1335454>.

21. Korotkova T.G., Bushumov S.A., Ksandopulo S.Yu.,

Solonnikova N.V. Studying the efficiency of treatment model mixtures of petroleum products with the modified sorbent made of ash-and-slag during dynamic sorption.

*Journal of Ecological Engineering*. 2019;20(11):202-209. <https://doi.org/10.12911/22998993/113582>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

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

**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**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию 22.12.2022.  
Одобрена после рецензирования 15.02.2023.  
Принята к публикации 28.02.2023.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

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

**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**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict interests**

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 22.12.2022.  
Approved after reviewing 15.02.2023.  
Accepted for publication 28.02.2023.