

Сорбент для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов и тяжёлых металлов на основе термоокисленного сапропеля

© 2025. И. В. Зыкова¹, д. х. н., профессор,
В. А. Исаков², к. х. н., доцент,
Н. М. Мишина¹, ассистент,

¹Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,

191186, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18,

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41,

e-mail: zykova-irina@yandex.ru

Изучение адсорбции водных растворов нефтепродуктов с концентрациями от 10 до 150 мг/дм³, фенолов с концентрациями от 0,01 до 1,0 ммоль/дм³ и тяжёлых металлов с концентрациями от 0,1 до 100 ммоль/дм³ проводили на термообработанном в окислительной среде при температуре 600 °С сапропеле в статических условиях при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Обработка экспериментальных данных согласно кинетическим моделям Бойда и Морриса-Вебера показала, что адсорбция ионов меди (II) термоокисленным сапропелем имеет смешанно-диффузионный характер. Зависимость величины адсорбции ионов меди (II) термоокисленным сапропелем от времени контакта удовлетворительно описывается кинетическими моделями как Лагергрена, так и Хо и Маккея. Термодинамические величины адсорбции ионов меди (II) из модельного раствора термоокисленным сапропелем рассчитаны по кинетической модели Хо и Маккея, учитывающей химическое взаимодействие между ионом меди (II) и функциональными группами адсорбента. Однако разделить вклад химического взаимодействия и диффузии на основании применения формальных кинетических уравнений достаточно сложно. Установлено, что адсорбция резорцина описывается уравнением Дубинина-Радushкевича, адсорбция нефтепродуктов и ионов меди (II) – уравнением полимолекулярной адсорбции Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Рассчитанные количественные характеристики адсорбции термообработанного при 600 °С сапропеля в окислительной среде по резорцину, ионам меди (II) и нефтепродуктам показали, что термообработанный сапропель может быть использован в качестве сорбента для очистки сточных вод от нефтепродуктов, фенолов и тяжёлых металлов.

Ключевые слова: адсорбция, термоокисленный сапропель, фенолы, нефтепродукты, тяжёлые металлы.

Sorbent based on thermally oxidized sapropel for wastewater treatment from phenols, oil products and heavy metals

© 2025. I. V. Zykova¹ ORCID: 0000-0002-4914-7761, V. A. Isakov² ORCID: 0000-0001-5669-7079,
N. M. Mishina¹ ORCID: 0009-0051-2144-5150

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, Russia, 191186,

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
41, B. St. Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, Russia, 173003,
e-mail: zykova-irina@yandex.ru

The adsorption of solutions of petroleum products with concentrations from 10 to 150 mg/dm³, phenols with concentrations from 0.01 to 1.0 mmol/dm³ and heavy metals with concentrations from 0.1 to 100 mmol/dm³ was studied. Sapropel, heat-treated at 600 °C in an oxidizing medium (TOS), was used as a sorbent. The assessment was carried out under static conditions at 1 g of sorbent per 200 cm³ of solution. Processing of experimental data according to the Boyd and Morris-Weber kinetic models showed that copper(II) ions adsorption by TOS has a mixed-diffusion character. The dependence of the copper(II) ions adsorption by TOS on the contact time is satisfactorily described by both Lagergren and Ho and McKay kinetic models. The thermodynamic values of the adsorption of copper(II) ions from a model solution by TOS were calculated using Ho and McKay kinetic model, taking into account the chemical interaction between the copper(II) ion and the functional groups of the adsorbent. However, it is quite difficult to determine the proportion of chemical interaction and diffusion based on formal kinetic equations. It was established that resorcinol adsorption is

described by the Dubinin-Radushkevich equation, while the oil products and copper(II) ions adsorption is described by the Brunauer-Emmett-Teller polymolecular adsorption equation (BET). The calculated quantitative characteristics of resorcinol, copper(II) ions and oil products adsorption by TOS showed that TOS can be used as a sorbent for wastewater treatment from oil products, phenols and heavy metals.

Keywords: adsorption, thermally oxidized sapropel, phenols, petroleum products, heavy metals.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию углеродминеральных сорбентов (УМС) в связи с тем, что они сочетают в себе как свойства активированных углей, признанных одними из самых эффективных сорбционных материалов, так и минеральных сорбентов, таких как силикагели, алюмосиликаты [1–3].

Для очистки воды от ионов тяжёлых металлов (ТМ) применяют синтетические ионообменные материалы, природные неорганические сорбенты: глинистые минералы, каолинит и монтмориллонит, органические композиционные сорбенты, такие как модифицированный активированный уголь, способные по донорно-акцепторному взаимодействию удерживать катионы металлов, модифицированные целлюлозные материалы, модифицированные аминокарбоксильными группами синтетические волокна, органо-минеральные композиционные материалы, модифицированный силикагель и др. Однако, несмотря на большое количество разработанных композиционных сорбентов, включая и наноструктурированные композиционные сорбенты, механизмы взаимодействия ТМ с ними, а также термодинамика и кинетика процесса теоретически до конца не проработаны. Кроме того, существуют большие трудности с получением предложенных материалов в промышленных масштабах [4–8].

В настоящее время для удаления токсиантов из водных сред большое внимание уделяется разработке сорбентов на основе принципов «зелёной химии», подразумевающей использование возобновляемого природного сырья [9–11].

Потенциальным сырьём для получения дешёвого и эффективного сорбента могут быть сапропели – возобновляемое природное органическое сырьё. На территории России сапропель встречается практически повсеместно, суммарные запасы составляют около 300 млрд м³. Только в Ленинградской и Новгородской областях ежегодно образуется до 1 млн м³ сапропели. В настоящее время сапропель не находит квалифицированного применения. Возрастание объёмов сапропели приводит к заболачиванию озёр, наносящему урон окружающей природной среде [12–15].

Продукт термоокисления сапропели, в силу исходного органо-минерального состава сырья, будет содержать как углеродную часть (продукты карбонизации органических веществ), так и минеральную часть. В настоящее время данные по изучению физико-химических закономерностей сорбционных процессов на термоокисленных сапропелях для ионов металлов и органических веществ, как из индивидуальных растворов, так и из многокомпонентных, содержащих одновременно вещества различной природы, отсутствуют. В связи с этим возникает необходимость в изучении закономерностей поглощения различных веществ сорбентом, обладающим сложной химической природой поверхности.

Целью исследования явилось получение сорбента на основе сапропели путём термоокисления и изучение адсорбции из модельных растворов сточных вод тяжёлых металлов на примере меди(II), фенолов на примере резорцина и нефтепродуктов на примере водорастворимой фракции бензина.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта для получения углеродминерального природного адсорбента использовали сапропель озера Липово Новгородской области с массовой долей органических веществ 69–70% [16], имеющий влажность 96%, высушенный до воздушно-сухого состояния при температуре 105 °С. В озёрах Новгородской области по предварительным данным учёных СПб ФИЦ РАН находится более 3 млн м³ сапропели [17].

Для получения сорбента на основе термоокисленного сапропели использовали высушенный при 105 °С до постоянной массы сапропель, который затем прокачивали в муфельной печи при температуре 600 °С до постоянной массы.

Нефтепродукты, фенолы и тяжёлые металлы входят в перечень приоритетных загрязняющих веществ, согласованный странами ООН для мероприятий по улучшению и охране окружающей среды. Нефтепродукты имеют длительный период полураспада, а продукты

их разложения также являются загрязнителями. Фенолы являются одними из самых токсичных веществ. Среди тяжёлых металлов приоритетными загрязнителями по данным Европейской экономической комиссии ООН являются Pb, Cd, Hg, Ni, Co, Cr, Cu, Zn [18].

Изучение адсорбции нефтепродуктов, фенолов и ТМ проводили при температуре 20 °С на термообработанном в окислительной среде при 600 °С сапропеле в статических условиях из модельных водных растворов, содержащих один загрязнитель, при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Для приготовления модельных растворов загрязнителей использовали сверхчистую воду (система очистки воды Best-S15 UV). В качестве модельных растворов нефтепродуктов, фенолов и ТМ использовали соответственно: водорастворимую фракцию бензина марки АИ-95, представляющую собой смесь моно- и полициклических ароматических углеводородов, с концентрациями 10; 25; 50; 100; 150 мг/дм³, растворы резорцина с концентрациями 0,10; 0,15; 0,25; 0,50; 1,00 ммоль/дм³, растворы меди(II) с концентрациями 1,0; 10,0; 25,0; 50,0; 75,0; 100,0 ммоль/дм³. Диапазон выбранных концентраций загрязнителей превышает ПДК для вод водоёмов санитарно-бытового водопользования в 10 и более раз.

Для определения энергии активации адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем изучали адсорбцию ионов меди(II) при температуре 40 °С.

Концентрации резорцина и водорастворимой фракции нефтепродуктов в модельных растворах определяли на анализаторе «ФЛЮОРАТ 02-2М», концентрацию ионов меди(II) в модельных растворах – потенциометрическим методом с использованием Cu-селективного электрода.

Эксперименты проводили в пятикратной повторности, статистическую обработку результатов проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Кинетические кривые адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем на примере модельного раствора ионов меди(II) с концентрацией 1 ммоль/дм³ представлены на рисунке 1.

Экспериментальные данные адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем во времени обработаны с использованием кинетических моделей Бойда, Морриса-Вебера, Лагергрена, Хо и Маккея (рис. 2) [19, 20].

Прямолинейная зависимость кривых адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем согласно кинетической модели Бойда (рис. 2а) позволяет говорить о том, что межфазный перенос лимитируется внутренней диффузией, однако, наличие излома на кривых адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем согласно кинетической модели Морриса-Вебера (рис. 2б) указывает

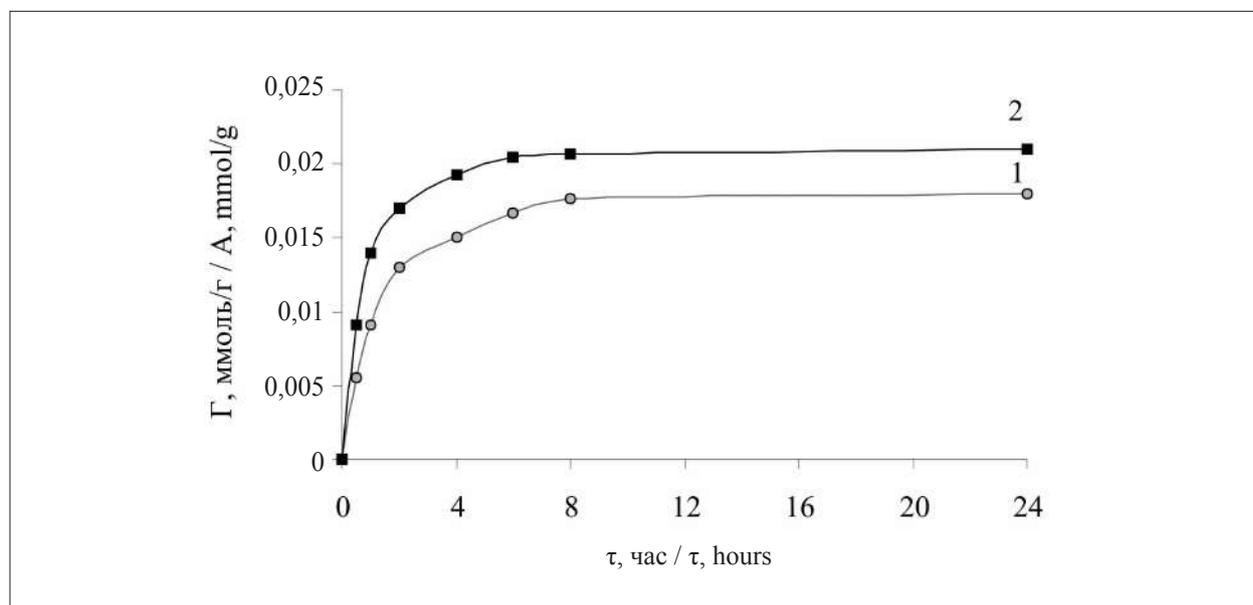


Рис. 1. Изменения адсорбции (Г, ммоль/г) ионов меди(II) термоокисленным сапропелем во времени (τ, ч) при температуре 20 °С (1) и 40 °С (2)
 Fig. 1. Changes in the copper(II) ions adsorption (A, mmol/g) by thermally oxidized sapropel at 20 °С (1) and 40 °С (2) over time (τ, hours)

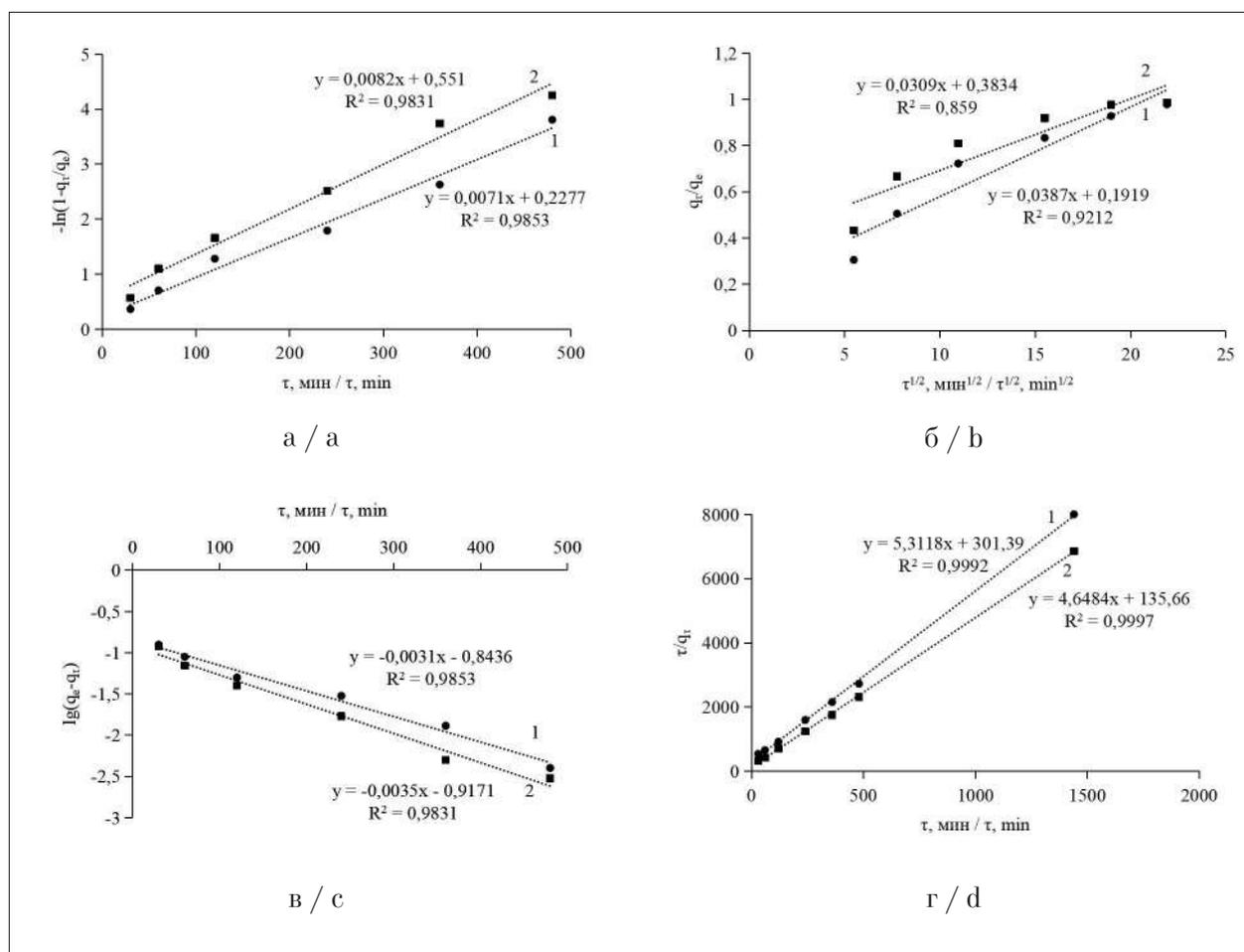


Рис. 2. Адсорбция ионов меди(II) термоокисленным сапропелем при температурах 20 °С (1) и 40 °С (2) во времени в линейных координатах кинетических моделей Бойда (а), Морриса-Вебера (б), Лагергрена (в), Хо и Маккея (г)

Fig. 2. Adsorption of copper(II) ions by thermally oxidized sapropel at 20 °C (1) and 40 °C (2) in time in linear coordinates of the kinetic models of Boyd (а), Morris-Weber (б), Lagergren (в), Ho and McKay (г)

на смешанно-диффузионный характер адсорбции.

Установлено, что зависимость величины адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем от времени контакта удовлетворительно описывается кинетическими моделями как Лагергрена (рис. 2в), так и Хо и Маккея (рис. 2г). Для кинетической модели Хо и Маккея коэффициент детерминации оказался выше. Вследствие этого термодинамические величины адсорбции ионов меди(II) из модельного раствора термоокисленным сапропелем рассчитаны по кинетической модели Хо и Маккея, учитывающей химическое взаимодействие между ионом меди(II) и функциональными группами адсорбента (табл. 1).

Однако разделить вклад химического взаимодействия и диффузии на основании применения формальных кинетических уравнений достаточно сложно.

Изотермы адсорбции нефтепродуктов, резорцина и ионов меди(II) термоокисленным сапропелем представлены на рисунке 3.

Степень очистки водных растворов загрязнителей термообработанным в окислительной среде при 600 °С сапропелем составляет 50–99% в зависимости от природы и концентрации загрязнителя.

Для описания процесса адсорбции резорцина наиболее применимо уравнение Дубинина-Радужкевича. Согласно теории Дубинина-Радужкевича адсорбция резорцина происходит в микропорах путём их объёмного заполнения (рис. 4). Для описания процессов адсорбции нефтепродуктов и ионов меди(II) наиболее применимо уравнение Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Согласно теории полимолекулярной адсорбции БЭТ адсорбция нефтепродуктов и ионов меди(II) происходит на поверхности сорбента (рис. 5).

Таблица 1 / Table 1

Термодинамические величины адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем
Thermodynamic values of copper(II) ions adsorption by thermally oxidized sapropel

Параметр / Parameter	Температура, °C / Temperature, °C	
	20	40
Константа скорости, г·ммоль ⁻¹ ·мин ⁻¹ The speed constant, g·mmol ⁻¹ ·min ⁻¹	0,0936±0,0029	0,1593±0,0411
Энергия активации, кДж/моль Activation energy, kJ/mol	20,26±0,25	

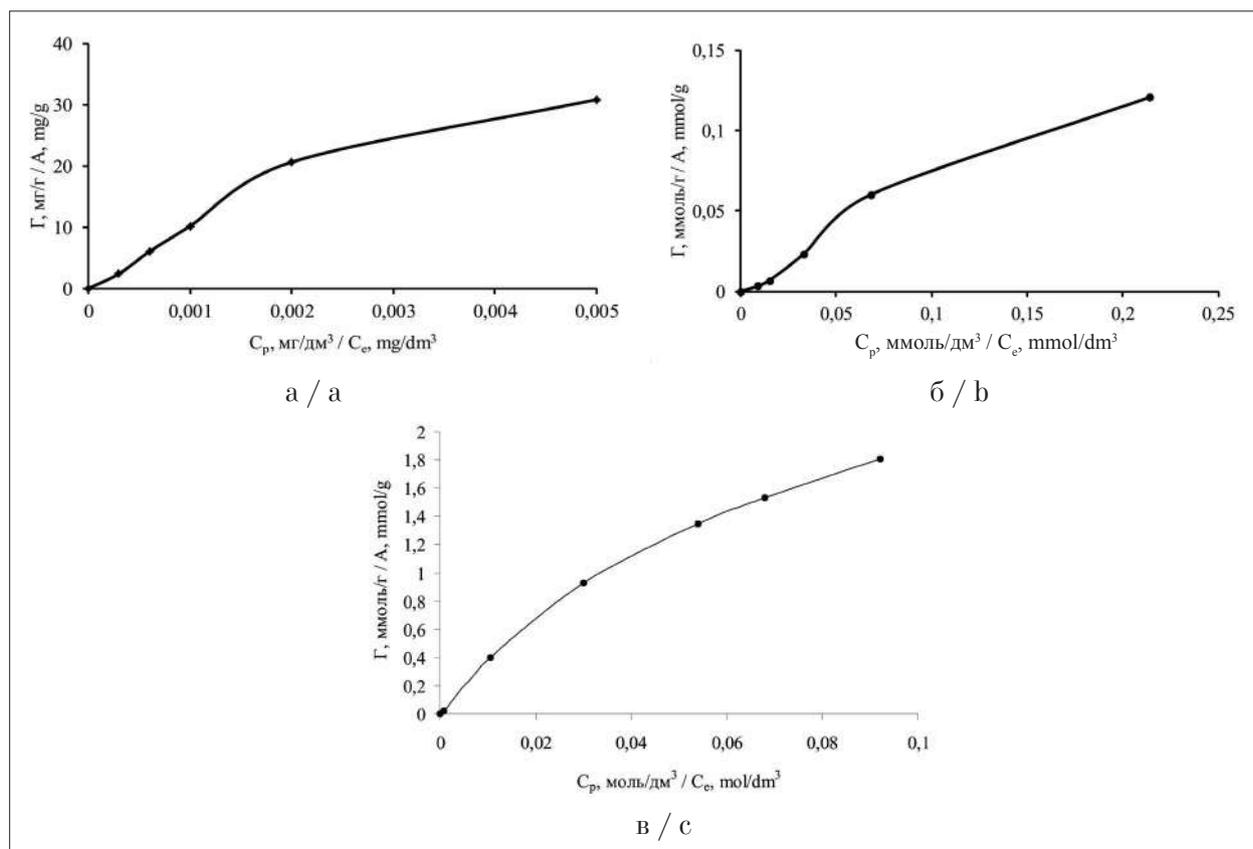


Рис. 3. Изотерма адсорбции нефтепродуктов (а), резорцина (б), ионов меди(II) (в) на термообработанном при 600 °С сапропеле в окислительной среде. Обозначения: Г, мг/г (ммоль/г) – величина адсорбции; C_p, мг/дм³ (ммоль/дм³, моль/дм³) – равновесная концентрация загрязнителя / **Fig. 3.** Isotherm of petroleum products (a), resorcinol (b), copper(II) ions (c) adsorption on sapropel heat-treated at 600 °C in an oxidizing medium. Legend: A, mg/g (mmol/g) – the value of adsorption; C_e, mg/dm³ (mmol/dm³, mol/dm³) – the equilibrium concentration of the pollutant

Количественные характеристики адсорбции в системах модельный раствор–сорбент представлены в таблице 2.

Согласно полученным данным (табл. 2), термообработанный сапропель эффективен для адсорбции из сточных вод нефтепродуктов, фенолов и ионов меди(II).

Закключение

Обработка экспериментальных данных согласно кинетическим моделям Бойда и Морриса-Вебера показала, что адсорбция

ионов меди(II) термоокисленным сапропелем имеет смешанно-диффузионный характер. Зависимость величины адсорбции ионов меди(II) термоокисленным сапропелем от времени контакта удовлетворительно описывается кинетическими моделями как Лагергрена, так и Хо и Маккея. Термодинамические величины адсорбции ионов меди(II) из модельного раствора термоокисленным сапропелем рассчитаны по кинетической модели Хо и Маккея, учитывающей химическое взаимодействие между ионом меди(II) и функциональными группами адсорбента. Однако, разделить вклад

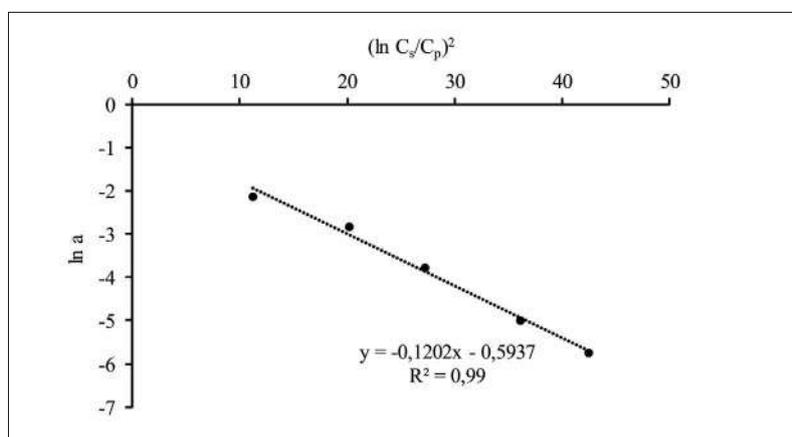


Рис. 4. Изотерма адсорбции резорцина на термообработанном при 600 °С сапропеле в окислительной среде в линейных координатах уравнения Дубинина-Радушкевича
Fig. 4. Isotherm of resorcinol adsorption on sapropel heat-treated at 600 °C in an oxidizing medium in linear coordinates of the Dubinin-Radostkevich equation

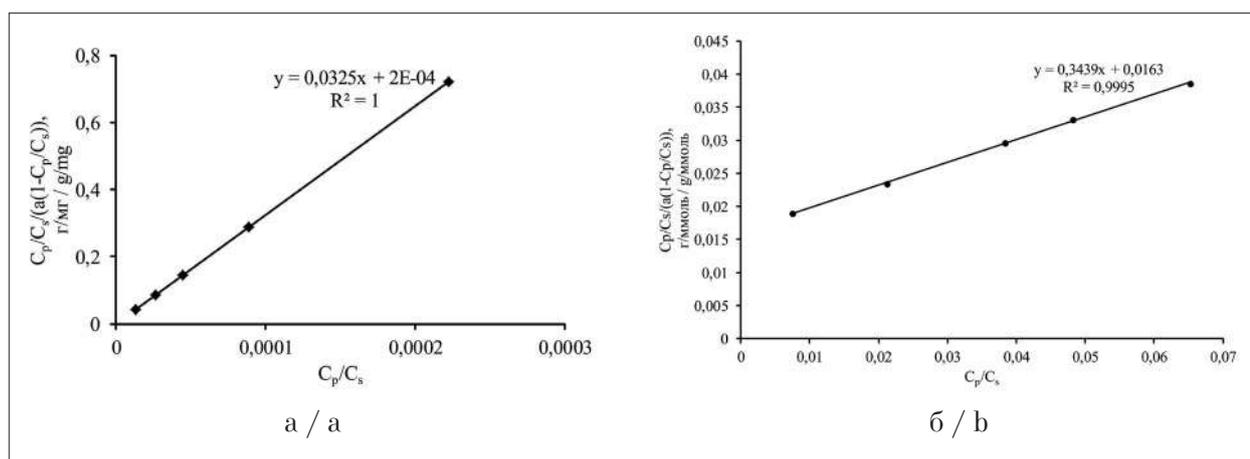


Рис. 5. Изотерма адсорбции нефтепродуктов (а) и ионов меди(II) (б) на термообработанном при 600 °С сапропеле в окислительной среде в линейных координатах уравнения БЭТ
Fig. 5. Isotherm of petroleum products (a) and copper(II) ions (b) adsorption on sapropel heat-treated at 600 °C in an oxidizing medium in linear coordinates of the BET equation

Таблица 2 / Table 2

Количественные характеристики адсорбции загрязнителей термоокисленным сапропелем
 Quantitative characteristics of pollutants' adsorption by thermally oxidized sapropel

Загрязнитель Pollutant	Характеристическая энергия адсорбции, кДж Characteristic adsorption energy, kJ	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	Константа адсорбционного равновесия Adsorption equilibrium constant	Удельная поверхность адсорбента, м ² /г Adsorbent specific surface area, m ² /g	Объём микропор адсорбента, см ³ /г Adsorbent micropores volume, cm ³ /g
Нефтепродукты* Oil products*	–	162,6±6,3	307,5±14,2	–	–
Резорцин Resorcinol	7,140±0,321	0,552±0,026	–	–	0,048±0,002
Медь(II) Copper(II)	–	2,78±0,12	22,07±1,05	210±9	–

Примечание: «–» – не рассчитывалось для данной теории адсорбции; * – предельная величина адсорбции нефтепродуктов рассчитывалась в мг/г.

Note: “–” was not calculated for this adsorption theory; * – the maximum value of the oil products adsorption was calculated in mg/g.

химического взаимодействия и диффузии на основании применения формальных кинетических уравнений достаточно сложно.

Изучение адсорбции нефтепродуктов, фенолов и ионов меди(II), проведённое на сапропеле, термообработанном в окислительной среде при 600 °С, показало, что адсорбция нефтепродуктов и ионов меди(II) из модельных растворов термоокисленным сапропелем в статических условиях наиболее полно описывается уравнением полимолекулярной адсорбции БЭТ, резорцина – уравнением Дубинина-Радущкевича. Рассчитанные количественные характеристики адсорбции термообработанного при 600 °С сапропеля в окислительной среде по резорцину, ионам меди(II) и нефтепродуктам показали, что термообработанный сапропель может быть использован в качестве сорбента для очистки сточных вод от нефтепродуктов, фенолов и тяжёлых металлов.

Литература

1. Ушакова Е.С., Соловьева Л.В., Ушаков А.Г. Упрочнение углеродных сорбентов введением минеральных присадок // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 129–133. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-129-133
2. Gallios G.P., Tolkou A.K., Katsoyiannis I.A., Stefusova K., Vaclavikova M., Deliyanni E.A. Adsorption of arsenate by nano scaled activated carbon modified by iron and manganese oxides // Sustainability. 2017. V. 9. No. 10. Article No. 1684. doi: 10.3390/su9101684
3. Нистратов А.В., Скарюкин А.С., Клушин В.Н. Получение и исследование пористой структуры минерально-углеродных адсорбентов на основе силикагеля и полимерных отходов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 2. С. 200–208. doi: 10.17308/sorpchrom.2019.19/739
4. Вайсман Я.И., Глушанкова И.С., Ширинкина Е.С., Давлетова С.Ф. Способ переработки лигнин-содержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности с получением сорбентов для очистки сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 3. С. 93–99. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-093-099
5. Abit K.E., Carlsen L., Nurzhanova A.A., Nauryzbaev M.K. Activated carbons from *Miscanthus* straw for cleaning water bodies in Kazakhstan // Eurasian Chemical-Technological Journal. 2019. V. 21. No. 3. P. 259–267. doi:10.18324/ectj867
6. Ushakova E., Kvashevaya E., Ushakov A. Innovative environment-saving technology using magnetic sorbents based on carbon-containing waste from coal // E3S Web Conf.: 3rd International Innovative Mining

Symposium. V. 41. Kemerovo: EDP Sciences, 2018. Article No. 02004. doi: 10.1051/e3sconf/20184102004

7. Rogovskii I.L., Kalivoshko O.M., Maksimovich K.Yu., Maksimovich E.Yu. Research of mixed carbon sorbents for removal of oil products from water and soil for preservation of environmental infrastructure // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 720. Vladivostok, 2021. Article No. 012108. doi: 10.1088/1755-1315/720/1/012108

8. Иканина Е.В., Марков В.Ф., Каляева М.И. Композиционные сорбенты для извлечения тяжёлых металлов – итоги последних лет // Бутлеровские сообщения. 2016. Т. 48. № 11. С. 101–113.

9. Родинков О.В., Вагнер Е.А., Бугайченко А.С., Москвин Л.Н. Сравнение эффективности углеродных сорбентов для концентрирования легколетучих органических веществ из влажных газовых сред для последующего газохроматографического определения // Журнал аналитической химии. 2019. Т. 74. № 9. С. 678–678. doi: 10.1134/S0044450219090081

10. Sabzehmeidani M.M., Mahnaee S., Ghaedi M., Heidari H., Roy V.A.L. Carbon based materials: a review of adsorbents for inorganic and organic compounds // Mater. Adv. 2021. V. 2. P. 598–627. doi: 10.1039/D0MA00087F

11. Mukhin V.M., Burakov A.Ye., Burakova I.V. Active carbon as nanoporous material for solving environmental problems // Advanced Materials & Technologies. 2017. No. 2. P. 50–56. doi: 10.17277/amt.2017.02

12. Сазанова М.Л., Сазанов А.В., Жуйкова И.А., Тугаринов Л.В. Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 26–36. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

13. Платонова Д.С., Масоров М.С., Адеева Л.Н. Сорбция меди гуминовыми кислотами из сапропеля Омской области // Вестник Омского университета. 2014. № 3. С. 47–50.

14. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J Supercrit. Fluid. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991

15. Успенская О.Н., Васючков И.Ю. Микроэлементы в сапропелях – природном материале на удобрение для органического земледелия // Агрохимия. 2019. № 10. С. 52–57. doi: 10.1134/S0002188119100132

16. Zyкова I.V., Isakov V.A. Preparation and study of carbon-mineral sorbents based on Novgorod sapropel. Part 1 // Fibre Chem. 2019. V. 50. No 5. P. 408–413. doi: 10.1007/s10692-019-09999-y

17. Loskutov S., Puhalsky Y., Mityukov A., Rybakina V., Ignatieva N. Effects of ultradisperse humic sapropel suspension on exudation of organic acids in different families of plants // Agriculture digitalization and organic production. Smart innovation, systems and technologies: proceedings of the 1st International Conference. V. 245. Singapore: Springer, 2022. P. 195–206. doi: 10.1007/978-981-16-3349-2_17

18. Батын А.Н., Фруммин Г.Т., Базылев В.Н. Основы общей и экологической токсикологии. СПб.: СпецЛит, 2009. 352 с.

19. Чугунов А.Д., Филатова Е.Г., Пожидаев Ю.Н., Адамович С.Н., Оборина Е.Н., Ушаков И.А. Кинетика адсорбции ионов никеля(II) цеолитом с иммобилизованным тиосемикарбазидом // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия. 2023. Т. 16. № 2. С. 244–254. doi: 10.31857/S0044185622700097

20. Маслова М.В., Иваненко В.И., Герасимова Л.Г. Влияние температуры на кинетику сорбции катионов стронция сорбентом на основе фосфата титана // Журнал физической химии. 2019. Т. 93. № 7. С. 1002–1008. doi: 10.1134/S0044453719060219

References

1. Ushakova E.S., Solovyova L.V., Ushakov A.G. Strengthening of carbon sorbents by the introduction of mineral additives // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 129–133 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-129-133

2. Gallios G.P., Tolkou A.K., Katsoyiannis I.A., Stefusova K., Vaclavikova M., Deliyanni E.A. Adsorption of arsenate by nano scaled activated carbon modified by iron and manganese oxides // Sustainability. 2017. V. 9. No. 10. Article No. 1684. doi: 10.3390/su9101684

3. Nistratov A.V., Skaryukin A.S., Klushin V.N. Production and investigation of porous structure of mineral-carbon adsorbents based on silica-gel and polymer wastes // Sorption and chromatography processes. 2019. V. 19. No. 2. P. 200–208 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2019.19/739

4. Vaysman Ya.I., Glushankova I.S., Shirinkina E.S., Davletova S.F. Method for processing lignin-containing wastes from the paper industry to produce sorbents for wastewater treatment // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 93–99 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-093-099

5. Abit K.E., Carlsen L., Nurzhanova A.A., Nauryzbaev M.K. Activated carbons from miscanthus straw for cleaning water bodies in Kazakhstan // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2019. V. 21. No. 3. P. 259–267. doi: 10.18321/ectj367

6. Ushakova E., Kvashevaya E., Ushakov A. Innovative environment-saving technology using magnetic sorbents based on carbon-containing waste from coal // E3S Web Conf.: 3rd International Innovative Mining Symposium. V. 41. Kemerovo: EDP Sciences, 2018. Article No. 02004. doi: 10.1051/e3sconf/20184102004

7. Rogovskii I.L., Kalivoshko O.M., Maksimovich K.Yu., Maksimovich E.Yu. Research of mixed carbon sorbents for removal of oil products from water and soil for preservation of environmental infrastructure // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 720. Vladivostok, 2021. Article No. 012108. doi: 10.1088/1755-1315/720/1/012108

8. Ikanina E.V., Markov V.F., Kalyaeva M.I. Composite sorbents for recovery of heavy metals: the results of recent years. 2016. V. 48. No. 11. P. 101–113 (in Russian)

9. Rodinkov O.V., Wagner E.A., Bugaichenko A.S., Moskvina L.N. Comparison of the efficiencies of carbon sorbents for the preconcentration of highly volatile organic substances from wet gas atmospheres for the subsequent gas-chromatographic determination // Journal of Analytical Chemistry. 2019. V. 74. No. 9. P. 678–678 (in Russian). doi: 10.1134/S0044450219090081

10. Sabzehmeidani M.M., Mahnaee S., Ghaedi M., Heidari H., Roy V.A.L. Carbon based materials: a review of adsorbents for inorganic and organic compounds // Mater. Adv. 2021. V. 2. P. 598–627. doi: 10.1039/D0MA00087F

11. Mukhin V.M., Burakov A.Ye., Burakova I.V. Active carbon as nanoporous material for solving environmental problems // Advanced Materials & Technologies. 2017. No. 2. P. 50–56. doi: 10.17277/amt.2017.02

12. Sazanova M.L., Sazanov A.V., Zhuikova I.A., Tugarinov L.V. Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 26–36 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

13. Platonova D.S., Masorov M.S., Adeeva L.N. Copper sorption with humic acids from sapropel of Omsk region // Herald of Omsk University. 2014. No. 3. P. 47–50 (in Russian).

14. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J Supercrit. Fluid. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991

15. Uspenskaya O.N., Vasyuchkov I.Yu. Trace elements in sapropel – natural fertilizer material for organic farming // Agrochemistry. 2019. No. 10. P. 52–57 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100132

16. Zykova I.V., Isakov V.A. Preparation and study of carbon-mineral sorbents based on Novgorod sapropel. Part 1 // Fibre Chem. 2019. V. 50. No 5. P. 408–413. doi: 10.1007/s10692-019-09999-y

17. Loskutov S., Puhalsky Ya., Mityukov A., Rybakina V., Ignatieva N. Effects of ultradisperse humic sapropel suspension on exudation of organic acids in different families of plants // Agriculture digitalization and organic production. Smart innovation, systems and technologies: proceedings of the 1st International Conference. V. 245. Singapore: Springer, 2022. P. 195–206. doi: 10.1007/978-981-16-3349-2_17

18. Батын А.Н., Фруммин Г.Т., Базылев В.Н. Fundamentals of general and environmental toxicology. Sankt-Peterburg: SpecLit, 2009. 352 p. (in Russian).

19. Chugunov A.D., Filatova E.G., Pozhidaev Yu.N., Adamovich S.N., Oborina E.N., Ushakov I.A. Kinetics of adsorption of nickel(II) ions by zeolite with immobilized thiocarbamide // J. Sib. Fed. Univ. Chem. 2023. V. 16. No. 2. P. 244–254 (in Russian). doi: 10.31857/S0044185622700097

20. Maslova M.V., Ivanenko V.I., Gerasimova L.G. Effect of temperature on the kinetics of the sorption of strontium cations by a sorbent based on titanium phosphate // Journal of Physical Chemistry. 2019. V. 93. No. 7. P. 1002–1008 (in Russian). doi: 10.1134/S0044453719060219