



DOI 10.22363/2313-2310-2022-30-2-177-188

УДК 663.63.0

Научная статья / Research article

Перспективы использования поверхностных вод Иркутской области для питьевого водоснабжения и производства безалкогольных напитков

О.И. Дзювина¹ , Т.В. Котова^{2,3}  , Ю.С. Федорова² ,А.С. Вальнюкова² , В.Ю. Масаев^{4,5} ¹Филиал Байкальского государственного университета в г. Усть-Илимск,
Усть-Илимск, Россия²Кемеровский государственный медицинский университет, Кемерово, Россия³Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия⁴Кузбасский государственный технический университет, Кемерово, Россия⁵Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, Кемерово, Россия t_kotova@inbox.ru

Аннотация. Актуальной проблемой современной цивилизации является обеспечение населения качественной питьевой водой. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) от заболеваний, распространяющихся через воду, страдает не менее 5—10 % населения. По данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека в девяти городах Сибирского федерального округа качество воды влияет на формирование заболеваемости населения (от 7,7 до 41,0 %). Анализ данных, представленных в государственных докладах по состоянию и охране окружающей среды Иркутской области, показал, что в поверхностных водах региона систематически наблюдается превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по фенолу, а в некоторых контролируемых районах и по хлороформу. Одним из основных компонентов, используемых при производстве различной безалкогольной продукции, является вода. Различные органические вещества, такие как фенолы, нефтепродукты, галогенорганические производные углеводородов, согласно требованиям к качеству воды, используемой для приготовления безалкогольных напитков, должны отсутствовать. В связи с этим целью работы явилось изучение возможности использования различных адсорбционных систем для очистки сточных вод Иркутской области для питьевого водоснабжения и производства безалкогольных напитков. Применяли адсорбционный метод. Исследования проводились на модельных водных растворах как индивидуальных веществ, так и при совместном присутствии. Проведено математическое моделирование сорбционного процесса в динамических условиях. Доказана возможность использования древесного угля для очистки сточных вод. Предварительная обработка активированного угля соляной кислотой практически не влияет на адсорбцию хлороформа, но приводит к увеличению адсорбции фенола. Соляная кислота способствует удалению ионов железа из пор сорбентов. Снижение степени очистки воды от фенола при повышении pH приводит к подавлению адсорбции. Установлено влияние фенола и хлороформа на величину адсорбции. Процесс сорбции лимитируется внешним массопереносом. Рассчитано расхождение между расчетными

© Дзювина О.И., Котова Т.В., Федорова Ю.С., Вальнюкова А.С., Масаев В.Ю., 2022

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0
International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

и экспериментальными выходными кривыми сорбции фенола и хлороформа из индивидуальных растворов и при их совместном присутствии.

Ключевые слова: поверхностные воды, загрязнения, фенол, хлороформ, сорбент, активный уголь, динамика

Вклад авторов. О.И. Дзювина — сбор и обработка материала, написание статьи. Т.В. Котова — анализ полученных данных, написание статьи. Ю.С. Федорова — анализ полученных данных, обработка материала. А.С. Вальнюкова — экспериментальное исследование динамики сорбционного процесса, обработка полученных данных. В.Ю. Масаев — обработка результатов по адсорбционным системам.

История статьи: поступила в редакцию 23.11.2021; принята к публикации 30.11.2021.

Для цитирования: Дзювина О.И., Котова Т.В., Федорова Ю.С., Вальнюкова А.С., Масаев В.Ю. Перспективы использования поверхностных вод Иркутской области для питьевого водоснабжения и производства безалкогольных напитков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 2. С. 177—188. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-2-177-188>

Prospects for the use of surface waters of the Irkutsk region for drinking water supply and the production of soft drinks

Oksana I. Dzyuvina¹  , Tatyana V. Kotova^{2,3} ,

Yuliya S. Fedorova² , Anastasia S. Valnyukova² , Vladislav Yu. Masaev^{4,5} 

¹Branch of the Baikal State University in Ust-Ilimsk, Ust-Ilimsk, Russia

²Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia

³Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

⁴Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

⁵Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russia

t_kotova@inbox.ru

Abstract. One of the urgent problems of modern civilization is the provision of the population with high-quality drinking water. According to the World Health Organization (WHO), at least 5—10 % of the population suffers from waterborne diseases. According to the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-being in nine cities of the Siberian Federal District, the influence of water quality on the formation of population morbidity (from 7,7 to 41,0 %) has been established. Analysis of the data presented in the State reports on the state and protection of the environment of the Irkutsk region showed that in the surface waters of the region there is a systematic excess of the maximum permissible concentration (MPC) for phenol, and in some controlled areas for chloroform. One of the main components used in the production of various non-alcoholic products is water. Various organic substances, such as phenols, petroleum products, halogenated derivatives of hydrocarbons, according to the requirements for the quality of water used for the preparation of soft drinks, should be absent. Therefore, the purpose of the study was the use of various adsorption systems for wastewater treatment in the Irkutsk region for drinking water supply and the production of soft drinks. Used the adsorption method. The studies were carried out on model aqueous solutions, both of individual substances and in their joint presence. Mathematical modeling of the sorption process under dynamic conditions has been carried out. As a result of the studies carried out, the possibility of using charcoal for wastewater treatment has been proven. Pretreatment of activated carbon with hydrochloric acid practically does not affect the adsorption of chloroform, but leads to an increase in the adsorption of phenol. Hydrochloric acid helps to remove iron ions from the pores of the sorbents. A decrease in the degree of water purification from phenol with an increase in pH leads to the suppression of adsorption. The effect of phenol and chloroform on the value of adsorption has been established. The sorption process is limited by external mass transfer. The discrepancy between the calculated and experimental output curves of phenol and chloroform sorption from individual solutions and in their joint presence is calculated.

Keywords: surface water, pollution, phenol, chloroform, sorbent, activated carbon, dynamics

Authors' contributions. O.I. Dzyuvina — collection and processing of the material, writing the article. T.V. Kotova — analysis of the data obtained, writing the article. Yu.S. Fedorova — analysis of the data obtained, processing of the material. A.S. Valnyukova — experimental study of the dynamics of the sorption process, processing of the data obtained. V. Yu. Masaev — processing of results on adsorption systems.

Article history: received 23.11.2021; accepted 30.11.2021.

For citation: Dzyuvina OI, Kotova TV, Fedorova YS, Valnyukova AS, Masaev VYu. Prospects for the use of surface waters of the Irkutsk region for drinking water supply and the production of soft drinks. *RUDN Journal of Ecology and Life safety*. 2022;30(2):177—188. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-1-177-188>

Введение

В производстве безалкогольной продукции (газированные напитки, соки, морсы и т. п.) доля воды в конечном продукте составляет более 80 %. Одним из параметров, определяющих качества пищевой продукции, является качество питьевой воды, используемой для приготовления. Вода, используемая в производстве безалкогольных напитков, по своим показателям должна соответствовать требованиям СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», введенного в действие с 1 марта 2021 г., и не содержать загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих уровень ПДК. Различные органические вещества, такие как фенолы, нефтепродукты, галогенорганические производные углеводов должны отсутствовать.

Для питьевых и хозяйственно-бытовых целей в Иркутской области используется вода из поверхностных и подземных источников водоснабжения. При этом на долю поверхностных водоемов приходится 86 % потребности воды и только 14 % потребления — на подземные источники. В связи с высокими темпами роста производств и использования химических веществ возрастает присутствие органических микрозагрязнителей в окружающей среде и, следовательно, в источниках питьевой воды. Во всем мире аналитическими методами обнаруживают наличие в малых концентрациях органические загрязняющие вещества в питьевой воде [1—3]. По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году» практически на всех контролируемых объектах наблюдается ПДК по фенолу и хлороформу в поверхностных водах р. Ангары. Аналогичная ситуация наблюдается и в 2020—2021 гг.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), от заболеваний, распространяющихся через воду, страдает не менее 5—10 % населения. Таким образом, доочистка воды от данных веществ в процессе водоподготовки является необходимой стадией как для питьевого водоснабжения, так и для производства безалкогольной продукции.

Для подготовки воды, направляемой для централизованного водоснабжения и производства напитков, используются различные методы [4]. Одним из распространенных методов обеззараживания является хлорирование. При хлорировании воды, содержащей органические вещества, образуются более токсичные соединения — хлороформ, хлорфенол и др. Также может быть использован метод озонирования (как предварительного, так и постозонирования) [3, 5]. Тем не менее

анализ используемых методов водоподготовки показывает, что независимо от используемых методов при обработке поверхностных вод, загрязненных лигнином и его производными, будут образовываться токсичные вещества — хлороформ, фенол и формальдегид.

К ведущему и наиболее перспективному направлению в технологии извлечения небольших количеств органических веществ из водных растворов относится сорбционный способ [5, 6].

Очистка с помощью активированного угля (АУ) находит широкое применение при обработке и очистке воды, где механизмы адсорбции, например, физическая сорбция или хемосорбция, позволяют загрязнителям перемещаться из жидкости на твердую поверхность. Для этих целей используют гранулированный АУ, обладающий низким содержанием минералов, высоким содержанием углерода, и высокой пористостью [7, 8].

Методы и материалы

Эффективность адсорбционной очистки вод от органических соединений сорбентами определялась по совокупности исследований равновесия, кинетики и динамики адсорбционного процесса. Характеристики сорбентов представлены в табл. 1. Кроме достаточно известных и используемых марок угля были использованы образцы древесного угля (ДУ), полученные в лабораторных условиях при переработке отходов лесоперерабатывающего производства на основе лиственницы.

Таблица 1

Основные характеристики используемых сорбентов

Показатель	Марка сорбента				
	АГ-3	СКД-515	КАУ	ПФС	Образец ДУ
Удельная поверхность по БЭТ, м ² /г	810	850	–	–	–
Насыпная плотность, г/дм ³	465	526	417	374	425
Массовая доля общей золы, %	8,0	–	5,4	1,3	6,0
Суммарный объем пор, дм ³ /кг	0,88	0,85	0,97	1,10	–
Основной размер частиц, мм	1,0-1,5	–	0,5-1,5	0,5-1,0	0,5-1,5
Прочность, %	88	75	90	86	80
Объем пор, дм ³ /кг:					
микро-	0,26	0,28	0,31	0,34	–
мезо-	0,09	0,11	0,66	0,76	–
макро-	0,53	0,33	–	–	–

Table 1

Main characteristics of the used sorbents

Indicator	Sorbent grade				
	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
BET specific surface area, m ² /g	810	850	–	–	–
Bulk density, g/dm ³	465	526	417	374	425
Mass fraction of total ash, %	8,0	–	5,4	1,3	6,0
Total pore volume, dm ³ /kg	0,88	0,85	0,97	1,10	–

Indicator	Sorbent grade				
	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
Main particle size, mm	1,0-1,5	–	0,5-1,5	0,5-1,0	0,5-1,5
Strength, %	88	75	90	86	80
Pore volume, dm ³ /kg:					
micro-	0,26	0,28	0,31	0,34	–
meso-	0,09	0,11	0,66	0,76	–
macro-	0,53	0,33	–	–	–

Исследование равновесия проводилось с использованием модельных водных растворов хлороформа и фенола с концентрациями в интервалах от 0,1 до 100 ПДК. Предварительно установлено оптимальное время контакта сорбента с изучаемыми системами, которое составило 30 мин.

Для определения концентрации хлороформа применялся газохроматографический метод, а для фенола — фотоколориметрический метод.

Изучалось адсорбционное равновесие в системах («водный раствор хлороформа — сорбент»; «водный раствор фенола — сорбент»; «водный раствор смеси фенола с хлороформом — сорбент»):

1) постоянная навеска каждого образца сорбента загружалась в водные растворы с переменными концентрациями сорбтива в изучаемом интервале (индивидуальные системы и при взаимном присутствии компонентов);

2) в течение 30 мин. навеска встряхивалась;

3) в фильтрате определялась концентрация вещества.

Величина равновесной адсорбции рассчитывалась по формуле

$$a = \frac{(C_0 - C_p) \times V}{m},$$

где a – величина равновесной адсорбции, моль/г; C_0 , C_p – исходная и равновесная концентрация вещества в растворе, моль/дм³; V – объем раствора, из которого ведется адсорбция, дм³; m – масса сорбента, г.

Изучение кинетики адсорбции проводилось с использованием модельных растворов с концентрациями вещества от 0,1 до 10 ПДК. Постоянная навеска образца сорбента помещалась в коническую колбу, заливалась точно известным объемом раствора с точно известной (постоянной) концентрацией адсорбтива и встряхивалась. Через определенное время (интервал времени контакта изменялся от 30 сек. до 60 мин.) определялась концентрация адсорбтива в растворе и рассчитывалась величина адсорбции.

Экспериментальное изучение динамики заключалось в установлении концентрации сорбтива в каждой порции фильтрата, полученного при прогонке раствора известной концентрации через колонку, заполненную сорбентом. Математическое моделирование непрерывного процесса адсорбции на всех исследованных АУ проводилось на основе фундаментального уравнения внешнедиффузионной динамики адсорбции с использованием адсорбционных констант уравнения Дубинина — Радушкевича и кинетических данных [9]. Критерием применимости расчетной модели послужило совпадение экспериментальных и рассчитанных динамических кривых при заданных параметрах извлечения.

Результаты и обсуждение

Исследование равновесия адсорбции позволяет получить информацию о природе взаимодействия адсорбтива с поверхностью сорбента, определить максимальную величину адсорбции, а также предположить способ регенерации сорбентов. Предварительное изучение сорбционного процесса в системах: «водный раствор хлороформа — сорбент», «водный раствор фенола — сорбент», «водный раствор фенола / хлороформа — сорбент» — показало, что адсорбционное равновесие в системах достигается только через 6 ч от начала процесса. Результаты изучения сорбционного процесса для индивидуальных систем и для сорбции из смеси представлены в табл. 2—4. Степени извлечения хлороформа и фенола как из индивидуальных смесей, так и при совместном присутствии имеют высокие значения и составляют 70—95 %. Экспериментальный образец древесного угля, полученного при пиролизе отходов лесопильного производства, показывает также оптимальные результаты по извлечению данных веществ в равновесных условиях. Процесс адсорбции пористыми углеродными материалами описывается уравнением Дубинина — Радускевича, которое позволяет рассчитать величину предельной адсорбции, характеристическую энергию E и объем адсорбционного пространства W .

Таблица 2

Адсорбционные параметры системы водный раствор хлороформа – углеродный сорбент

Показатель	Марка АУ				
	АГЗ	СКД-515	КАУ	ПФС	Экспериментальный образец ДУ
a_{\max} , моль/г	6,85	7,22	7,96	4,56	3,20
Степень извлечения хлороформа, %	89	90	95	85	80
E , кДж/моль	9,97	10,15	10,39	11,68	8,90
W , $\text{дм}^3/\text{кг}$	0,73	0,77	0,85	0,49	0,29

Table 2

System adsorption parameters chloroform aqueous solution – carbon sorbent

Indicator	Sorbent grade				
	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
a_{\max} , mol/g	6,85	7,22	7,96	4,56	3,20
Chloroform recovery, %	89	90	95	85	80
E , kJ/mol	9,97	10,15	10,39	11,68	8,90
W , $\text{дм}^3/\text{кг}$	0,73	0,77	0,85	0,49	0,29

Таблица 3

Адсорбционные параметры системы водный раствор фенола – углеродный сорбент

Показатель	Марка АУ				
	АГЗ	СКД-515	КАУ	ПФС	Экспериментальный образец ДУ
a_{\max} , моль/г	6,25	6,84	6,36	6,56	4,10
Степень извлечения фенола, %	86	88	83	90	75
E , кДж/моль	12,50	15,60	13,54	16,88	12,90
W , $\text{дм}^3/\text{кг}$	0,71	0,76	0,79	0,54	0,25

**System adsorption parameters
aqueous solution of phenol – carbon sorbent**

Indicator	Sorbent grade				
	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
a_{\max} , mol/g	6,25	6,84	6,36	6,56	4,10
Phenol recovery, %	86	88	83	90	75
E , kJ/mol	12,50	15,60	13,54	16,88	12,90
W , dm ³ /kg	0,71	0,76	0,79	0,54	0,25

Таблица 4

**Адсорбционные параметры системы
водный раствор хлороформа / фенола – углеродный сорбент
(совместное присутствие)**

Показатель	Марка АУ				
	АГ-3	СКД-515	КАУ	ПФС	Экспериментальный образец ДУ
a_{\max} , моль/г по хлороформу	2,95	3,05	3,1	2,1	1,6
a_{\max} , моль/г по фенолу	1,75	2,5	2,4	3,6	1,5

Table 4

**System adsorption parameters chloroform / phenol aqueous solution – carbon sorbent
(joint presence)**

Indicator	Sorbent grade				
	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
a_{\max} , mol/g by chloroform	2,95	3,05	3,1	2,1	1,6
a_{\max} , mol/g by phenol	1,75	2,5	2,4	3,6	1,5

Для исследуемых углей, в том числе экспериментального образца ДУ, значение характеристической энергии, рассчитанной по результатам процесса сорбции, доказывает микропористую структуру сорбента. Объемы адсорбционного пространства, определенные по результатам сорбции из индивидуальных растворов, имеют сопоставимые значения и согласуются с имеющими данными по суммарному объему пор по активным углям марок АГ-3, СКД-515 и КАУ. Значения теплот адсорбции во всех изученных случаях находятся в пределах значений от 7,5 до 18 кДж/моль. Можно предложить, что изначально извлечение фенола и хлороформа углеродными сорбентами происходит в результате физической адсорбции. Следовательно, для регенерации отработанных сорбентов можно будет использовать термическую обработку или обработку водяным паром.

Проведено экспериментальное исследование кинетики адсорбции фенола и хлороформа при совместном присутствии из водных растворов АУ, рассчитаны кинетические параметры (табл. 5).

Коэффициенты внешнего массопереноса в система АУ – вода – сорбтив

Вещество	Уголь	АГ-3	СКД-515	КАУ	ДУ
Хлороформ	βп, с-1	0,9837	1,0034	0,9986	0,5284
Фенол	βп, с-1	0,8564	0,8436	0,8466	0,4856

Table 5

External mass transfer coefficients into the system AC – water – sorbtiv

Sorbent grade	AG-3	SKD-515	KAC	PFR	Charcoal sample
Chloroform	βп, с-1	0,9837	1,0034	0,9986	0,5284
Phenol	βп, с-1	0,8564	0,8436	0,8466	0,4856

Близость величин коэффициента внешнего массопереноса свидетельствует о том, что природа и структура сорбента не оказывают влияния на характер массопереноса. Анализ экспериментальных данных по кинетике адсорбции изученных систем показывает, что в области концентраций от 0,1 до 10 ПДК по загрязняющему веществу (хлороформу или фенолу) сорбция контролируется внешним массопереносом. Увеличение концентрации сорбтива в растворе приводит к сокращению времени, лимитируемого внешним массопереносом. При концентрации хлороформа 0,6 мг/дм³ (10 ПДК) оно составляет 110 сек, а при концентрации 10 мг/дм³ (167 ПДК) — всего 30 сек.

Таким образом, в области концентраций загрязняющих веществ (хлороформа и фенола), наблюдаемых в поверхностных источниках воды в Иркутской области, при проведении процесса адсорбционной очистки в динамических условиях можно ожидать высокую степень извлечения по изучаемым веществам. Данные, полученные для экспериментального образца ДУ на основе пиролиза древесных отходов, также позволяют предположить возможность его использования для очистки.

Экспериментальное изучение динамики сорбционного процесса предполагает последовательный подбор параметров (тип сорбента, длина неподвижного слоя, скорость потока и др.) и получение экспериментальных выходных кривых, зависящих от одной варьируемой переменной (например, скорости потока раствора) при фиксированных значениях остальных переменных. Это связано со значительными затратами времени. Математическое моделирование динамики, осуществляемое на основе теоретических зависимостей, описывающих массоперенос, значительно сокращает объем экспериментальных исследований динамики адсорбции.

Математическое моделирование непрерывного процесса адсорбции на всех исследованных АУ проведено на основе фундаментального уравнения внешне-диффузионной динамики адсорбции с использованием адсорбционных констант уравнения Дубинина — Радужкевича и кинетических данных.

На рисунке 1 представлены экспериментальные и расчетные выходные кривые фенола и хлороформа при совместном присутствии для неподвижного фильтрующего слоя сорбента (АУ СКД-515) длиной 2 м при средней скорости потока 2 м/ч.

Сопоставление изотерм адсорбции смеси фенола и хлороформа в водном растворе с изотермами адсорбции индивидуальных водных растворов показало,

что из смеси каждый компонент адсорбируется слабее, чем из индивидуального водного раствора.

Эта закономерность сохраняется при адсорбции хлороформа, причем адсорбция хлороформа на АУ выше, чем адсорбция фенола, что, вероятно, связано с его меньшей растворимостью в воде (C_s фенола = 925 ммоль/дм^3 , C_s хлороформа = $68,68 \text{ ммоль/дм}^3$), а также меньшим по сравнению с фенолом вандерваальсовским размером молекулы — $0,64 \text{ нм}$ хлороформа, $0,67 \text{ нм}$ фенола.

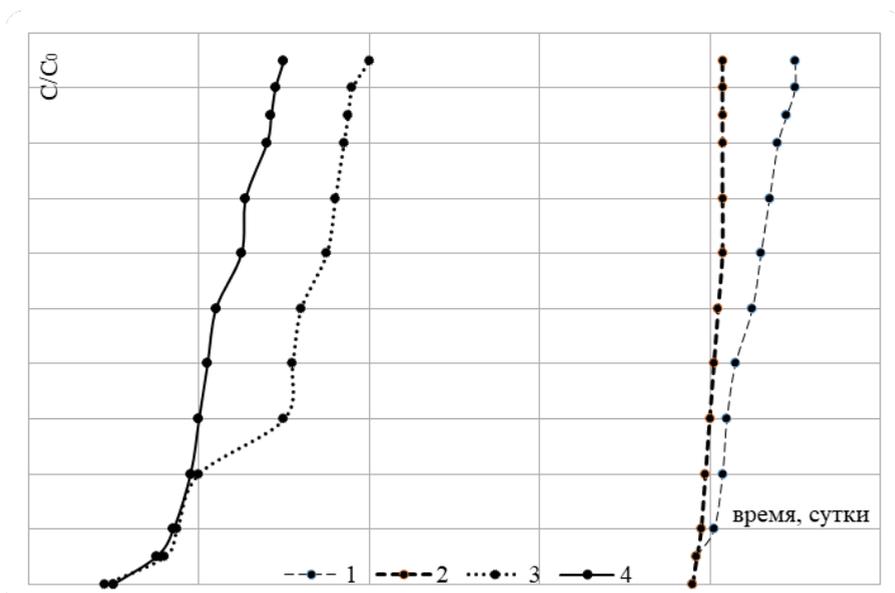


Рис. 1. Экспериментальные (2, 4) и теоретические (1, 3) выходные кривые адсорбции фенола и хлороформа при совместном присутствии на АУ СКД-515: $V = 2 \text{ м/ч}$, $L = 1 \text{ м}$ (1, 2), $L = 2 \text{ м}$ (3, 4)

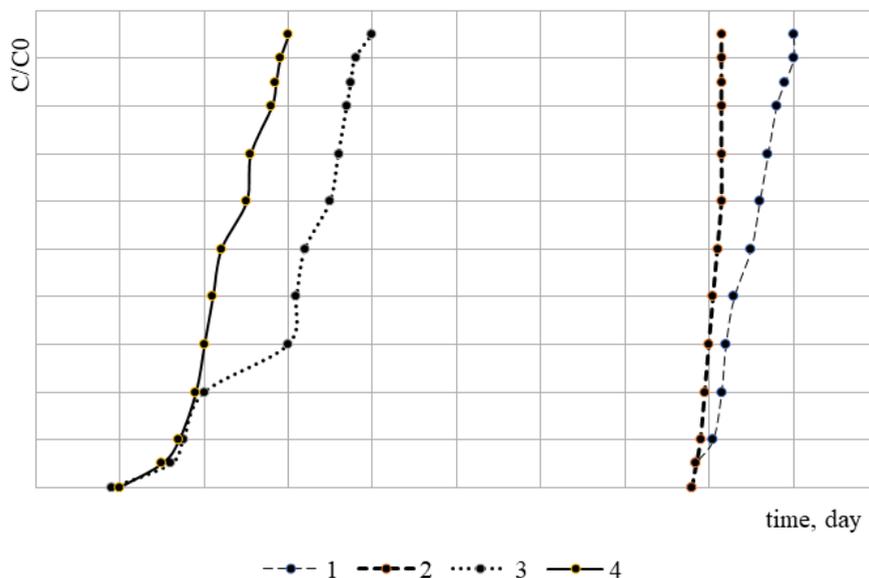


Fig. 1. Experimental (2, 4) and theoretical (1, 3) output curves of phenol and chloroform adsorption in the presence of SKD-515 on AC: $V = 2 \text{ m/h}$, $L = 1 \text{ m}$ (1, 2), $L = 2 \text{ m}$ (3, 4)

Экспериментально установлено, что предварительная обработка АУ соляной кислотой практически не влияет на адсорбцию хлороформа, но приводит к увеличению адсорбции фенола. При обработке углей раствором соляной кислоты происходит изменение состава поверхностных функциональных групп, при этом гидроксидная группа фенола образует дополнительную водородную связь с кислородсодержащей поверхностной группой угля. Благодаря этому взаимодействию адсорбция фенола значительно увеличивается по сравнению с адсорбцией на необработанных адсорбентах. Таким образом, соляная кислота способствует удалению ионов железа из пор сорбентов, которые, размещаясь преимущественно в наиболее узких доступных участках мезопор, блокируют входы в целые области микропористой структуры угля.

Исследование влияния рН среды показало снижение степени очистки воды от фенола при повышении рН, что обусловлено образованием фенолят-ионов, которое приводит к подавлению адсорбции. При этом рН раствора практически не влияет на адсорбцию хлороформа.

Важным фактором, обуславливающим выбор технологической схемы, является кинетика процесса адсорбции, т.е. определение стадии массопереноса, контролирующего скорость процесса адсорбции и значения коэффициентов массопереноса. Установлено, что время процесса адсорбции, лимитируемое внешним массопереносом, сокращается при увеличении концентрации фенола и хлороформа в растворе. Полученные данные позволяют предположить, что при проведении процесса адсорбции в динамических условиях можно ожидать высокую степень извлечения хлороформа и фенола при их совместном присутствии из очищаемой воды при высоких скоростях фильтрации. Теоретически определены коэффициенты внешнего массопереноса, необходимые для оптимизации непрерывного процесса адсорбции.

Критерием применимости расчетной модели служит совпадение экспериментальных и рассчитанных динамических кривых при заданных параметрах извлечения. Полученные результаты показывают, что формы выходных кривых, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью математической модели, совпадают на участке до отношения концентраций 0,05, далее формы кривых отличаются. Таким образом, можно сделать вывод, что для оценки времени проскока (т.е. времени работы сорбционного фильтра) можно использовать математическую модель и не проводить исследование сорбции в динамических условиях.

Исследование процессов адсорбции из водных растворов фенола и хлороформа экспериментальными образцами ДУ, полученного в результате пиролиза древесных отходов лесопильного производства (лиственница), позволило предварительно определить объем адсорбционного пространства и оценить возможность его использования в перспективе для очистки поверхностных вод от фенола и хлороформа при их совместном присутствии.

Выводы

1. Установлено влияние на величину адсорбции фенола и хлороформа при совместном присутствии природы сорбента, способа получения, пористой структуры, величины удельной поверхности, способа подготовки. Определено, что по совокупности параметров наиболее эффективным для сорбционного извлечения

фенола и хлороформа при их совместном присутствии из изученных сорбентов является АУ-СКД-515. Проведенные исследования экспериментальных образцов ДУ на основе древесных отходов лесопильного производства показали возможность использования полученного угля для извлечения фенола и хлороформа в области низких концентраций.

2. В области концентраций от 0,1 до 10 ПДК изученных сорбтивов (хлороформа и фенола), наиболее отражающих содержание загрязняющих веществ в поверхностных водах Иркутской области, процесс сорбции лимитируется внешним массопереносом.

3. Рассчитано расхождение между расчетными и экспериментальными выходными кривыми сорбции фенола и хлороформа из индивидуальных растворов и при их совместном присутствии, которое составило в среднем 2 %.

Список литературы

- [1] Houtman C. J., Kroesbergen J., Lekkerkerker-Teunissen K., Van der Hoek J.P. Human health risk assessment of the mixture of pharmaceuticals in Dutch drinking water and its sources based on frequent monitoring data // *Sci. Total Environ.* 2014. № 496. Pp. 54—62.
- [2] Borrull Josep, Colom Agustí, Fabregas Josepa, Borrull Francesc, Pocurull Eva. Presence, behavior, and removal of selected organic micropollutants through drinking water treatment // *Chemosphere.* 2021. Vol. 276. 130023.
- [3] Verliefde A., Cornelissen E., Amy G., Van der Bruggen B., Van Dijk H. Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration // *Environ. Pollut.* 2007. № 146. Pp. 281—289.
- [4] Ким А. Н., Графова О.Е. Современные методы очистки воды в локальных объектах: монография СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. 280 с.
- [5] Дзювина О.И. Оценка эффективности сорбционной очистки питьевой воды от хлороформа // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2008. № 16. С. 479—484
- [6] Мусеев Т. С., Солдатов К.В. Анализ современных сорбентов, на основе материалов органического происхождения // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук.* 2017. № 1—1. С. 69—73.
- [7] Dai Y. J., Liu M., Li J.J., Yang S.S., Sun Y., Sun Q.Y., Wang W.S., Lu L., Zhang K.X., Xu J.Y., Zheng W.L., Hu Z.Y., Yang Y.H., Gao Y.W., Liu Z.H. A review on pollution situation and treatment methods of tetracycline in groundwater // *Sep. Sci. Technol.* 2020. № 55. Pp. 1005—1021.
- [8] Lima L., Baêta B.E. L., Lima D.R. S., Afonso R.J. C. F., De Aquino S.F., Libânio M. Comparison between two forms of granular activated carbon for the removal of pharmaceuticals from different waters // *Environ. Technol.* 2016. № 37. Pp. 1334—1345.
- [9] Галимова Р. З., Шайхиев И.Г., Алмазова Г.А., Свергузова С.В. Исследование кинетики процессов адсорбции фенола отходами валяльно-войлочного производства // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2016. № 10. С. 179—184.

References

- [1] Houtman CJ, Kroesbergen J, Lekkerkerker-Teunissen K, Van der Hoek JP. Human health risk assessment of the mixture of pharmaceuticals in Dutch drinking water and its sources based on frequent monitoring data. *Sci. Total Environ.* 2014;(496):54—62.
- [2] Borrull Josep, Colom Agustí, Fabregas Josepa, Borrull Francesc, Pocurull Eva. Presence, behavior and removal of selected organic micropollutants through drinking water treatment. *Chemosphere.* 2021;276:130023.
- [3] Verliefde A, Cornelissen E, Amy G, Van der Bruggen B, Van Dijk H. Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration. *Environ. Pollut.* 2007;(146):281—289.
- [4] Kim AN, Grafova OE. Modern methods of water purification in local objects: monograph. *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Publ. Saint Petersburg.* 2016. 280 p. (In Russ.)
- [5] Dzyuvina OI. Evaluation of the efficiency of sorption purification of drinking water from chloroform. *Chemistry for sustainable development.* 2008;(16):479—484. (In Russ.)
- [6] Museev TS, Soldatov KV. Analysis of modern sorbents based on materials of organic origin. *Actual problems of the humanities and natural sciences.* 2017;1—1:69—73. (In Russ.)

[7] Dai YJ, Liu M, Li JJ, Yang SS, Sun Y, Sun QY, Wang WS, Lu L, Zhang KX, Xu JY, Zheng WL, Hu ZY, Yang YH, Gao YW, Liu ZH. A review on pollution situation and treatment methods of tetracycline in groundwater. *Sep. Sci. Technol.* 2020;(55):1005–1021.

[8] Lima L, Baêta BE L, Lima DR S, Afonso RJ CF, De Aquino SF, Libânio M. Comparison between two forms of granular activated carbon for the removal of pharmaceuticals from different waters. *Environ. Technol.* 2016;(37):1334–1345.

[9] Galimova RZ, Shaikhiev IG, Almazova GA, Svergzuzova SV. Investigation of the kinetics of phenol adsorption processes by waste felt-felt production. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova.* 2016;(10):179–184.

Сведения об авторах:

Дзювина Оксана Ивановна, кандидат технических наук, доцент, преподаватель цикловой комиссии механизации, технологии и информатизации, Филиал Байкальского государственного университета в г. Усть-Илимске. ORCID 0000-0001-9288-1594; SPIN-код: 5961-0590. E-mail: chloroform@mail.ru

Котова Татьяна Вячеславовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры фармацевтической и общей химии, Кемеровский государственный медицинский университет; ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Технологии инновационного развития», Уральский государственный экономический университет. Российская федерация, 650056, Кемерово, Ворошилова, 22 А. ORCID 0000-0002-1601-7371; SPIN-код: 2073-0189. E-mail: t_kotova@inbox.ru

Федорова Юлия Сергеевна, кандидат фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры фармакологии, Кемеровский государственный медицинский университет. ORCID 0000-0002-5543-0513; SPIN-код: 2591-2967. E-mail: fedorova_yuliya_sergeevna@mail.ru

Вальнюкова Анастасия Сергеевна, кандидат химических наук, доцент кафедры фармацевтической и общей химии, Кемеровский государственный медицинский университет. ORCID 0000-0002-8084-2536; SPIN-код: 4987-5386. E-mail: nastya711@bk.ru

Масаев Владислав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства подземных сооружений и шахт, Кемеровский государственный технический университет; доцент кафедры ландшафтной архитектуры, Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия. ORCID 0000-0003-0709-1278; SPIN-код: 2228-3178. E-mail: masaev-62@mail.ru

Bio notes:

Oksana I. Dzyuvina, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Teacher of the Cycle Commission of Mechanization, Technology and Informatization, Branch of the Baikal State University in Ust-Ilimsk. ORCID 0000-0001-9288-1594; SPIN-code: 5961-0590. E-mail: chloroform@mail.ru

Tatyana V. Kotova, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor of the Department of Pharmaceutical and General Chemistry, Kemerovo State Medical University; Leading Researcher, Scientific and Educational Center “Technologies of Innovative Development”, Ural State Economic University, 22 A Voroshilov St., Kemerovo, 650056, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1601-7371; SPIN-code: 2073-0189. E-mail: t_kotova@inbox.ru

Yulia S. Fedorova, Candidate of Pharmaceutical Sciences, Assistant Professor, Associate Professor of the Department of Pharmacology, Kemerovo State Medical University. ORCID 0000-0002-5543-0513; SPIN-code: 2591-2967. E-mail: fedorova_yuliya_sergeevna@mail.ru

Anastasia S. Valnyukova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Pharmaceutical and General Chemistry, Kemerovo State Medical University. ORCID 0000-0002-8084-2536; SPIN-code: 4987-5386. E-mail: nastya711@bk.ru

Vladislav Yu. Masaev, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Associate Professor of the Department of Construction of Underground Structures and Mines, Kuzbass State Technical University; Associate Professor at the Department of Landscape Architecture, Kuzbass State Agricultural Academy. 7. ORCID 0000-0003-0709-1278; SPIN-code: 2228-3178. E-mail: masaev-62@mail.ru