

Исследование кинетики адсорбции трихлорэтилена из водных растворов

© 2020. Т. А. Краснова, д. т. н., профессор, А. К. Горелкина, к. х. н., доцент,
Н. В. Гора, к. т. н., ст. преподаватель, Н. С. Голубева, к. т. н., доцент,
И. В. Тимошук, д. т. н., профессор, И. В. Буянова, д. т. н., профессор,
Кемеровский государственный университет,
650056, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6,
e-mail: ecolog1528@yandex.ru

Проведено исследование кинетики адсорбции трихлорэтилена из водных растворов на активных углях (АУ) марок СКД-515, ПФС, КсАУ, Пуrolат-Стандарт. Изучен механизм массопереноса при адсорбции трихлорэтилена на АУ исследуемых марок. Построены кинетические кривые, характеризующие изменение величины адсорбции во времени. Кинетические кривые проанализированы в координатах «степень достижения равновесия γ от времени τ ». Данные зависимости позволили выявить модель структуры гранул АУ. Для системы «активный уголь – водный раствор трихлорэтилена» определено, что в интервале 7–40 мин лимитирующей стадией процесса адсорбции, в зависимости от свойств АУ, является внешняя диффузия. Рассчитаны коэффициенты внешнего массопереноса для исследуемых углей, их величины близки и имеют достаточно высокие значения, что указывает на высокую скорость сорбционного процесса лимитируемого внешним массопереносом. Получены данные, необходимые для инженерных расчётов параметров адсорбционной колонны.

Ключевые слова: адсорбция, кинетика, активные угли, трихлорэтилен.

Study of the adsorption kinetics of trichloroethylene from aqueous solutions

© 2020. T. A. Krasnova ORCID: 0000-0002-3546-3561, A. K. Gorelkina ORCID: 0000-0002-3782-2521,
N. V. Gora ORCID: 0000-0002-6055-8570, N. S. Golubeva ORCID: 0000-0002-2188-8331,
I. V. Timoschuk ORCID: 0000-0002-1349-2812, I. V. Buyanova ORCID: 0000-0002-2801-8478,
Kemerovo State University,
6, Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650043,
e-mail: ecolog1528@yandex.ru

The kinetics of adsorption deals with the questions of determining the rate of adsorption and the adsorption capacity of adsorbent granules and the issues of adsorptive diffusion in single granules. Therefore, the study of kinetics is one of the most important issues in the study of adsorption. The research of kinetics of trichloroethylene adsorption from water solution on active carbon (A.C.) of grades CKD-515, PFC, CoAC, Puerolate – Standard was made. The primary information on the adsorption rate obtained during the experiment, i. e. the rate of granule saturation by adsorbate is represented by kinetic curves, which characterize the change in the value of adsorption with time.

The mechanism of mass transfer during trichloroethylene adsorption on A.C. of explored grades was studied, and kinetic curves describing change in value of adsorption in time were built. The kinetic curves were analyzed in coordinates γ vs τ . Dependence data allow finding out the model of active carbon granules structure. One of the objectives of this study is to find a controlling type of mass transfer, which can be solved using the method developed by R.M. Marutovsky. For this purpose dimensionless kinetic parameters T were calculated and graphs of T (calculated theoretically) versus (experimental process time) were plotted for the same γ values. It was determined that for the system “active carbon – water solution of trichloroethylene” the limiting stage of adsorption process in interval 7–40 minutes depending of active carbon characteristic is external diffusion. Coefficients of external mass transfer for explored carbon are calculated, their magnitudes are close and have fairly high values, which indicates high speed of sorption process limiting by external mass transfer. Data for engineering calculation of adsorption column parameters are found.

Keywords: adsorption, kinetics, activated carbon, trichloroethylene.

Проблема присутствия в питьевой воде поллютантов, в том числе галогенорганических, продолжает оставаться достаточно острой. Загрязнение водных источников сточными водами промышленных предприятий, образование галогенорганических компонентов в процессе водоподготовки и ряд других причин обуславливают актуальность данной проблемы. Среди соединений постоянно присутствующих в воде и принадлежащих к группе тригалогенметанов выделяют трихлорэтилен (ТХЭ), относящийся к 1 классу опасности.

В промышленности ТХЭ применяют для производства гербицидов, хладагентов, различных кислот; для обезжиривания металлических изделий, в качестве растворителя смол, красителей, битумов, фосфора.

При обеззараживании воды хлором в процессе водоподготовки очень высока вероятность появления в водопроводной воде побочных продуктов обеззараживания, в том числе ТХЭ [1].

Трихлорэтилен обладает аллергенным, токсическим, мутагенным и канцерогенным действием на организм человека [1]. Ещё в 2012 г. Всемирная организация здравоохранения признала ТХЭ канцерогенным.

Накоплены данные [2–4] о возможности развития у людей онкологических заболеваний, связанных с употреблением воды, содержащей ТХЭ. Последние исследования [5] свидетельствуют о том, что ТХЭ повышает риск рака печени, почек, пищевода, шейки матки. Обнаружена связь между регулярным воздействием на организм человека ТХЭ и последующим развитием болезни Паркинсона.

Трихлорэтилен очень опасен для водных организмов и может вызвать значительные изменения в экосистеме. Согласно гигиеническим нормативам ГН 2.1.5.2280-07 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» (Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03) ПДК трихлорэтилена в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 0,005 мг/дм³ [6–8].

В связи с этим исследования, направленные на разработку технологии доочистки воды системы централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения от ТХЭ, являются своевременными.

Среди успешно применяемых для этой цели процессов, можно назвать сорбционную доочистку с использованием пористых материалов [9]. Одним из таких материалов является активный уголь (АУ).

Для разработки адсорбционной технологии доочистки воды от ТХЭ на АУ необходимо выполнить комплексные исследования, включающие изучение равновесия, кинетики и динамики процесса адсорбции.

Ранее было проведено исследование равновесия адсорбции ТХЭ из водных растворов на АУ (табл. 1). Проведена аппроксимация экспериментально полученных изотерм адсорбции с использованием моделей мономолекулярной адсорбции Ленгмюра и теории объёмного заполнения пор Дубинина–Радужкевича. Определены константы всех указанных уравнений и установлены особенности и механизм адсорбции, также получены основные адсорбционные параметры.

В представленной работе изучалась кинетика адсорбции. Целью исследования являлось установление механизма массопереноса и расчёт коэффициентов массопереноса, необходимых для выполнения инженерных расчётов параметров промышленной адсорбционной колонны.

Объекты и методы

Объектом исследования стали сорбенты следующих марок СКД-515, ПФС, КсАУ, Пуrolat-Стандарт, их основные характеристики представлены в таблице 1.

Адсорбция, как и любой реальный процесс, происходит во времени. Кинетика адсорбции рассматривает вопросы скорости отработки адсорбционной ёмкости гранул адсорбента и вопросы диффузии адсорбтива в единичных гранулах. Поэтому исследование кинетики – один из важнейших этапов в изучении адсорбции.

Элементарный акт адсорбции осуществляется практически мгновенно, следовательно, временные зависимости адсорбции определяются в основном механизмом диффузии, т. е. подвода адсорбтива к месту адсорбции. В случае пористых адсорбентов, кроме внешней диффузии, важную роль начинает играть внутренняя диффузия, заключающаяся в переносе адсорбтива в порах адсорбента при наличии в них градиента концентрации. Механизм такого переноса может зависеть от концентрации адсорбтива и размеров пор [10, 11].

Результаты и обсуждение

В ходе эксперимента первичная информация о скорости насыщения гранулы адсорбатом представлена кинетическими кривыми (рис. 1, см. цветную вкладку), характеризующими изменение величины адсорбции во времени. Кинетические исследования процесса

адсорбции для исследуемой системы показали, что для всех образцов АУ (СКД-515, ПФС, КсАУ, Пуrolат-Стандарт) равновесие в адсорбционной системе достигается в течение 100–200 мин в зависимости от марки угля.

Кинетические кривые проанализированы в координатах γ от τ . Степень достижения равновесия рассчитывалась по формуле:

Таблица 1 / Table 1

Характеристики углеродных сорбентов / Characteristics of carbon sorbents

| Марка активного угля Brand of sorbent | СКД-515 SKD-515 | ПФС PFS | КсАУ KsAU | Пуrolат-Стандарт Purolat-Standart | |
|--|---|---|--|---|-------|
| Производитель Manufacturer | Сорбент, Россия Sorbent, Russia | | Англия Eurocarb, UK | Синтез, Россия Sintez, Russia | |
| Сырьё / Raw | смесь каменных углей / coal | фенолформаль- дегидная смола henolformalde- hyde resin | скорлупа кокосовых орехов coconut shell | антрацит anthracite semi-coke | |
| Форма / Form | гранулирован- ный, цилиндр granule, cylinder | гранулирован- ный, шарообраз- ная / granule, spherical | дроблённый, неправильной crushed, irregular | дроблённый, неправильная crushed, irregular | |
| Карбонизация и активация Carbonation and activation | двухстадийная, парогазовая two-stage, combined-cycle | | | одностадийная, парогазовая one-stage, combined-cycle | |
| Размер частиц, мм Particle size, mm | 0,5–1,5 | 1,0–1,5 | 1,5–3,0 | 0,1–3,0 | |
| Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³ | 0,52 | 0,37 | 0,49 | 0,68 | |
| Прочность, % Strength, % | 75 | 86 | 97 | 70–80 | |
| Удельная поверхность пор (S _{БЭТ}), м ² /г The surface of the pores, m ² /g | 791 | 1037 | 1512 | 311 | |
| Суммарный объём пор по воде, см ³ /г The total volume of pore water, cm ³ /g | 0,62 | 1,20 | 0,951 | 0,500 | |
| Объём пор, см ³ /г / Pore volume, cm ³ /g: | | | | | |
| микро- / micro- | 0,36 | 0,42 | 0,622 | 0,070 | |
| мезо- / meso- | 0,20 | 0,08 | 0,110 | 0,000 | |
| макро- / macro- | 0,06 | 0,70 | 0,219 | 0,430 | |
| рН водной вытяжки, ед. рН pH aqueous extract, units of pH | 7,6 | 7,8 | – | 8–9 | |
| Содержание активного кислорода, ммоль-экв/г The content of active oxygen, µmol/g ² : | кислотного типа (СОЕ ОН ⁻) acid type | 0,338 | 0,252 | 0,238 | 0,238 |
| | фенольный -ОН phenolic | 0,181 | 0,192 | 0,218 | 0,218 |
| | карбоксильный -СООН / carboxyl | – | 0,060 | – | – |
| | лактонный -СООН / lactone | 0,157 | – | 0,020 | 0,020 |
| | основного типа (СОЕ Н ⁺) / main type | 0,571 | – | 0,120 | 0,120 |

Примечание: «–» – отсутствует.
Note: “–” – missing.

**Т. А. Краснова, А. К. Горелкина, Н. В. Гора,
Н. С. Голубева, И. В. Тимощук, И. В. Буянова**
**«Исследование кинетики адсорбции трихлорэтилена
из водных растворов». С. 51**

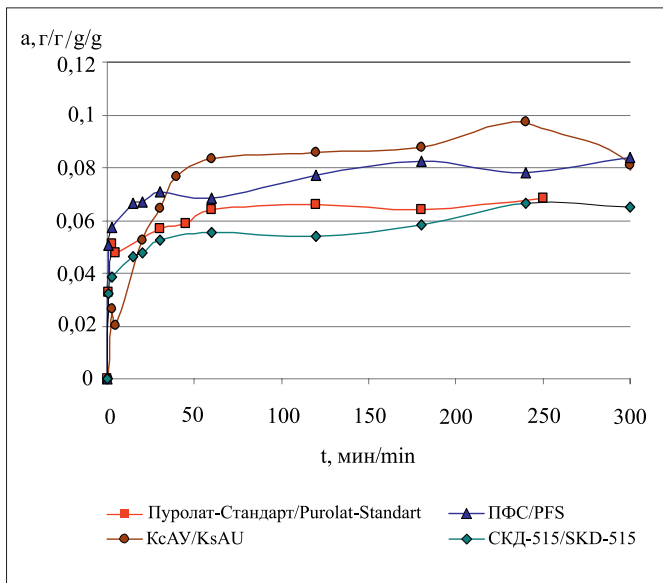


Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции трихлорэтилена углеродными сорбентами
Fig. 1. Kinetic curves of the trichloroethylene adsorption by carbon sorbents

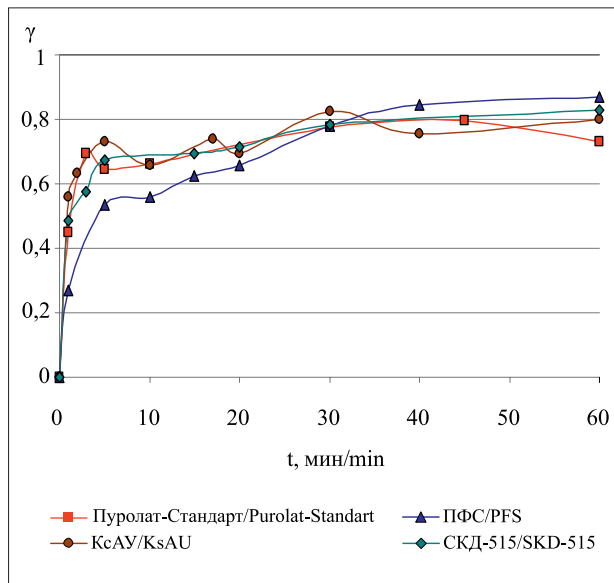


Рис. 2. Зависимости степени достижения адсорбционного равновесия от времени адсорбции
Fig. 2. Dependencies of the degree of achievement of the adsorption equilibrium on the adsorption time

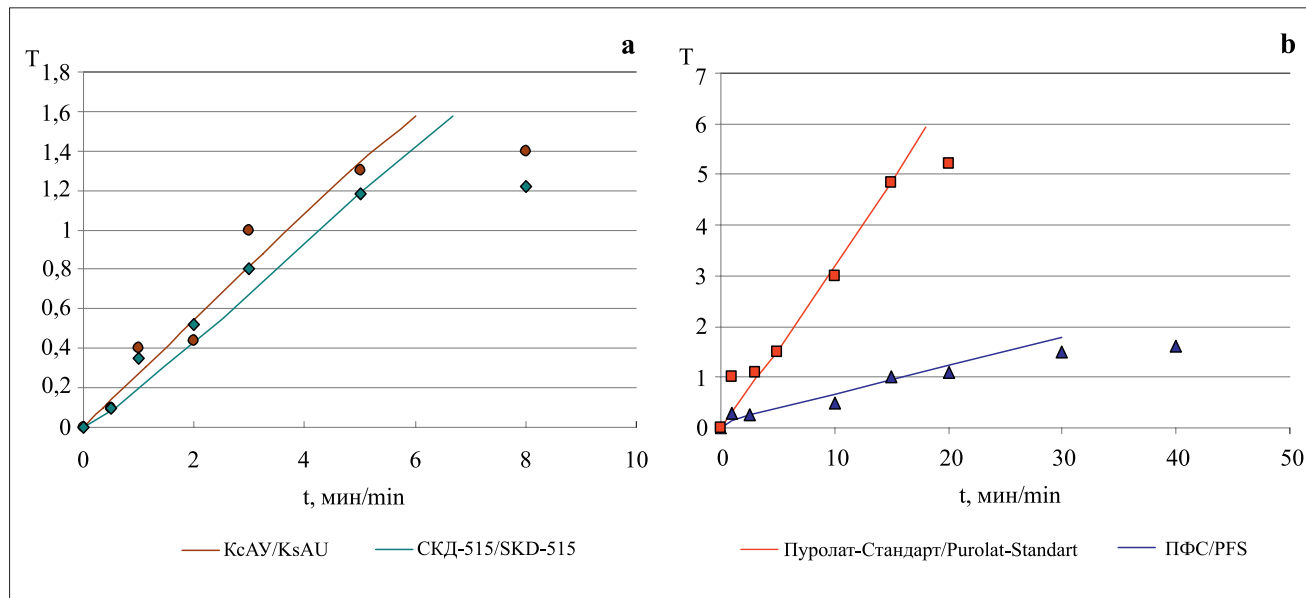


Рис. 3. Теоретические кинетические кривые адсорбции в системе «активный уголь – водный раствор трихлорэтилена»: а – КсАУ, СКД 515, б – Пуролат-Стандарт, ПФС
Fig. 3. Theoretical kinetic curves of adsorption in «activated carbon – an aqueous solution of trichloroethylene» systems: а – KsAU, SKD-515; б – Purolat-Standart, PFS

$\gamma = a_\tau / a_p$, где a_τ – адсорбция за время τ ; a_p – значение равновесной адсорбции.

Данные зависимости позволяют выяснить модель структуры гранул АУ, так как для изучения кинетики адсорбции необходимо учитывать, к какой из моделей (квазигомогенной или бипористой) относятся зёрна сорбента. Начальный участок кривой зависимости степени достижения адсорбционного равновесия от времени носит прямолинейный характер вплоть до $\gamma = 0,6-0,9$ (рис. 2, см. цветную вкладку), высокие значения γ на прямолинейном участке предполагают соответствие гранул используемых сорбентов квазигомогенной модели.

Полученные данные позволяют использовать данную модель для расчёта параметров кинетики адсорбции.

Одной из задач данной работы является нахождение контролирующего вида массопереноса, которую возможно решить при помощи метода, разработанного Р.М. Марутовским [12, 13].

С этой целью были рассчитаны безразмерные кинетические параметры T и построены зависимости величин T от τ (рис. 3, см. цветную вкладку). Графики зависимости T (рассчитанной теоретически) от величины τ (экспериментального времени протекания процесса) при одинаковых значениях γ представляют собой прямую, проходящую через начало координат, свидетельствуя о том, что на этом этапе в течение 7–40 мин процесс адсорбции лимитируется внешним массопереносом, в зависимости от свойств АУ.

По мере приближения к равновесию экспериментальные точки начинают отклоняться от прямой, это объясняется тем, что в этом случае при приближении к равновесию градиент удельной адсорбции уменьшается, а, следовательно, падает и скорость внешнего массопереноса, пропорционального градиенту.

По мере приближения к равновесию экспериментальные точки начинают отклоняться от прямой, это объясняется тем, что в этом случае при приближении к равновесию градиент удельной адсорбции уменьшается, а, следовательно, падает и скорость внешнего массопереноса, пропорционального градиенту.

Скорость приближения процесса адсорбции из растворов к равновесию зависит от того, насколько далеко от равновесия находится в данный момент система, и насколько она пропорциональна площади поверхности контакта жидкости с адсорбентом – dS [14, 15]:

$$\frac{da}{dSd\tau} = \beta_a(a_p - a_\tau)$$

$$-\frac{dC}{dSd\tau} = \beta_c(C_\tau - C_p)$$

Разность величин концентраций в данный момент C_τ и при наступлении равновесия C_p или разность равновесной удельной адсорбции a_p и величины удельной адсорбции a_τ к моменту измерения τ , называется движущей силой процесса; β_a и β_c в этих уравнениях называются коэффициентами массопереноса.

Как показали исследования, для системы «АУ – водный раствор ТХЭ» лимитирующей стадией процесса адсорбции является внешняя диффузия, коэффициент внешнего массопереноса (β_n) может быть найден по тангенсу угла наклона прямой зависимости безразмерного коэффициента T от τ .

Расчёты показали, что величина β_p составляет 0,2517; 0,0293; 0,0308; 0,2607 с⁻¹ для АУ Пуролат-Стандарт, СКД-515, КсАУ и ПФС, соответственно. Для углеродных сорбентов марок ПФС и Пуролат-Стандарт коэффициенты внешнего массопереноса близки и имеют достаточно высокое значение в сравнении с другими изучаемыми марками сорбентов. Это вероятно связано с наиболее развитой системой транспортных макро- и мезопор для АУ марок ПФС и Пуролат-Стандарт (табл. 1), так как на миграцию вещества из объёма раствора существенное влияние могут оказывать как условия переноса молекул адсорбирующегося вещества к поверхности зерна адсорбента, так и размеры и характер пористости частиц адсорбента, определяющих путь миграции молекул от внешней границы по системе пор к центру зерна [16, 17].

Внешнедиффузионный механизм и рассчитанные коэффициенты массопереноса позволяют ожидать высокую скорость извлечения компонента из очищаемой воды при фильтрации через неподвижный слой сорбента, с целью максимального использования ёмкости слоя сорбента можно рекомендовать снижение скорости фильтрования по мере отработки угольного фильтра [18, 20].

Заключение

Проведённая работа позволила выяснить модель структуры гранул изучаемых сорбентов; установить механизм массопереноса в системах «АУ – водный раствор ТХЭ»; показать влияние структуры углей на условия переноса;

определить коэффициент массопереноса, необходимый для инженерных расчётов.

Внешнедиффузионный механизм и рассчитанные коэффициенты массопереноса, имеющие высокое значение ($\beta_p = 0,0293, 0,2607, 0,0308, 0,2517 \text{ с}^{-1}$ для АУ марок СКД-515, ПФС, КсАУ, Пуrolат-Стандарт соответственно), позволяют ожидать высокую скорость извлечения компонента из очищаемой воды при фильтрации через неподвижный слой сорбента, с целью максимального использования ёмкости слоя сорбента можно рекомендовать снижение скорости фильтрования по мере отработки угольного фильтра.

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания «Инициативные научные проекты» 19.4713. 2017/БЧ.

Литература

1. Елдышев Ю.Н. В стране беда – питьевая вода // Экология и жизнь. 2008. № 9 (82). С. 19–23.
2. Егорова Н.А., Букшук А.А., Красовский Г.Н. Гигиеническая оценка продуктов хлорирования питьевой воды с учётом множественности поступления в организм // Гигиена и санитария. 2013. № 2. С. 18–23.
3. Hwang B.F., Jaakkola J.J., Guo H.R. Water disinfection byproducts and the risk of specific birth defects: a population-based cross-sectional study in Taiwan // Environmental Health. 2008. V. 7 (1). P. 19–29.
4. Nieuwenhuijsen M.J., Grellier J., Smith R., Iszatt N., Bennett J., Best N. The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water // Philosophical Transaction of The Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences. 2009. V. 367 (1904). P. 4043–4076.
5. Давыдов М.И., Аксель Е.М. Заболеваемость злокачественными новообразованиями России и стран СНГ в 2006 г // Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН. 2008. Т. 19. № 2 (прил. 1). С. 52–90.
6. Красовский Г.Н., Егоров Н.А. Критерии опасности галогенсодержащих веществ, образующихся при хлорировании воды // Токсикологический вестник. 2002. № 3. С. 12–17.
7. Шкатова Е.Ю., Масальцева О.Г., Оксужян А.В. Ядовитые технические жидкости: учеб. пособие. Ижевск: ИГМА, 2013. 32 с.
8. Краснова Т.А., Сколупович Ю.Л. Обеззараживание воды в системе питьевого водоснабжения. Новосибирск: НГАСУ, 2012. 114 с.
9. Radovic L.R., Silva I.F., Ume J.I. An experimental and theoretical study of the adsorption of aromatic posing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons // Carbon. 1997. V. 35. No. 9. P. 1339–1348.

10. Podkościelny P., Nieszpore K. Adsorption of phenols from aqueous solutions: Equilibria, calorimetry and kinetics of adsorption // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. V. 354. No. 1. P. 282–291.

11. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Рода И.Г. Адсорбция органических веществ из воды. Л.: Химия, 1990. 256 с.

12. Тимофеев Д.П. Кинетика адсорбции. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 252 с.

13. Парфит Г., Рочестер К. Адсорбция из растворов на поверхностях твёрдых тел. М.: Мир, 1996. 488 с.

14. Федоткин И.М., Когановский А.М., Рода И.Г., Марутовский Р.М. Об определении коэффициента внешнего массообмена и адсорбции из растворов // Физическая химия. 1994. Т. 48. № 2. С. 473–475.

15. Timoshchuk I.V. Technology of afterpurification of drinking water from organic contaminants in production of foodstuff // Foods and Raw Materials. 2016. V. 4. No. 1. P. 61–69.

16. Corwin C.J. Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbents after intermittent loading and throughout backwash cycles // Water research. 2011. V. 45. No. 2. P. 417–426.

17. Krasnova T.A., Timoschuk I.V., Gorelkina A.K., Dugarjav J. The choice of sorbent for adsorption extraction of chloroform from drinking water // Foods and Raw materials. 2017. No. 2. P. 189–196.

18. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis // J. Coll. Inter. Sci. 2004. V. 276. P. 47–62.

19. Сапина Н.В., Дзювина О.И. Доочистка питьевой воды для производства восстановленных молочных продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 3. С. 20–26.

References

1. Yeldyshev Yu.N. The country has a trouble with drinking water // Ekologiya i zhizn. 2008. No. 9 (82). P. 19–23 (in Russian).
2. Yegorova N.Ah., Bukshuk A.A., Krasovsky G.N. Hygienic assessment of chlorination products of drinking water, taking into account the plurality of intake // Gigiena i sanitariya. 2013. No. 2. P. 18–23 (in Russian).
3. Hwang B.F., Jaakkola J.J., Guo H.R. Water disinfection byproducts and the risk of specific birth defects: a population-based cross-sectional study in Taiwan // Environmental Health. 2008. V. 7 (1). P. 19–29. doi: 10.1186/1476-069X-7-23
4. Nieuwenhuijsen M.J., Grellier J., Smith R., Iszatt N., Bennett J., Best N. The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water // Philosophical Transaction of The Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences. 2009. V. 367 (1904). P. 4043–4076. doi: 10.1098/rsta.2009.0116
5. Davydov M.I., Aksel E.M. Incidence of malignant neoplasms in Russia and CIS countries in 2006 // Vestnik

RONTs im. N.N. Blokhina RAMN. 2008. V. 19. No. 2 (Annex. 1). P. 52–90 (in Russian).

6. Krasovsky G.N., Yegorov N.Ah. Hazard criteria of halogen-containing substances formed during chlorination of water // *Toksikologicheskiy vestnik*. 2002. No. 3. P. 12–17 (in Russian).

7. Shkatova E.Yu., Masaltsev O.G., Oksuzyan A.V. Poisonous technical liquids: the tutorial. Izhevsk: ISMA, 2013. 32 p. (in Russian).

8. Krasnova T.A., Skolubovich Yu.L. Water disinfection in the drinking water supply system. Novosibirsk: NGASU, 2012. 114 p. (in Russian).

9. Radovic L.R., Silva I.F., Ume J.I. An experimental and theoretical study of the adsorption of aromatic possessing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons // *Carbon*. 1997. V. 35. No. 9. P. 1339–1348. doi: 10.1016/S0008-6223(97)00072-9

10. Podkościelny P., Nieszpore K. Adsorption of phenols from aqueous solutions: Equilibria, calorimetry and kinetics of adsorption // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. V. 354. No. 1. P. 282–291. doi: 10.1177/02636174117708867

11. Kaganovsky A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M., Roda I.G. Adsorption of organic substances from water. Leningrad: Khimiya, 1990. 256 p. (in Russian).

12. Timofeyev D.P. The kinetics of adsorption. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1962. 252 p. (in Russian).

13. Parfit G., Rochester K. Adsorption from solutions on surfaces of solids. Moskva: Mir, 1996. 488 p. (in Russian).

14. Fedotkin I.M., Kaganovsky A.M., Roda I.G., Muratovski R.M. On determination of the coefficient of external mass transfer and adsorption from solutions // *Fizicheskaya khimiya*. 1994. V. 48. No. 2. P. 473–475 (in Russian).

15. Timoshchuk I.V. Technology of afterpurification of drinking water from organic contaminants in production of foodstuff // *Foods and Raw Materials*. 2016. V. 4. No. 1. P. 61–69. doi: 10.21179/2308-4057-2016-1-61-69

16. Corwin C.J. Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbents after intermittent loading and throughout backwash cycles // *Water research*. 2011. V. 45. No. 2. P. 417–426. doi: 10.1016/j.watres.2010.08.039

17. Krasnova T.A., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Dugarjav J. The choice of sorbent for adsorption extraction of chloroform from drinking water // *Foods and Raw materials*. 2017. No. 2. P. 189–196. doi: 10.21603/2308-4057-2017-2-145-150

18. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis // *J. Coll. Inter. Sci*. 2004. V. 276. P. 47–62. doi: 10.1016/j.jcis.2004.03.048

19. Sapine N.V., Dzuvinina O.I. Aftertreatment of drinking water in production of regenerated milk products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2007. No. 3. P. 20–26. doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-020-026