

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АДсорбЦИИ ТРИХЛОРЕТИЛЕНА (ТХЭ) НА АКТИВНЫХ УГЛЯХ

А.К. Горелкина, Т.А. Краснова, И.В. Тимощук, Н.В. Гора, Н.С. Голубева

Кемеровский государственный университет

Проведено исследование динамики адсорбции трихлорэтилена из водных растворов на активных углях (АУ) марок СКД-515, АБГ, Пуrolат-Стандарт, отличающихся составом, способом получения, структурой и химическим состоянием поверхности. Время работы фильтрующего слоя до проскока уменьшается в ряду угли СКД-515 > АБГ > Пуrolат-Стандарт, что обусловлено пористой структурой углей и природой функциональных кислородсодержащих групп на поверхности углерода. Отмечено также, что на адсорбцию влияет взаимодействие ТХЭ с функциональными группами поверхности угля. Изучена эффективность адсорбции ТХЭ на различных активных углях при постоянной скорости потока. Показано, что уменьшение скорости потока раствора через фильтр способствует увеличению динамической адсорбционной емкости, что неоспоримо подтверждает внутридиффузионное торможение массопереноса.

Ключевые слова: адсорбция, динамика, активные угли, трихлорэтилен

Study of the Dynamics of the Adsorption of Trichloroethylene (TCE) on Active Carbons

A.K. Gorelkina, T.A. Krasnova, I.V. Tymoshchuk, N.V. Gora, N.S. Golubeva

Kemerovo State University, 650056 Kemerovo, Russia

The dynamics of adsorption of trichloroethylene from aqueous solutions on active carbons (AC) of the SKD-515, ABG, Purolat-Standart grades, differing in composition, method of preparation, structure and chemical state of the surface, was studied. The operating time of the filtering layer before breakthrough decreases in the series SKD-515 > ABG > Purolat-Standart coal, which is caused by the porous structure of the coal and the nature of the oxygen-containing functional groups on the carbon surface. It was also noted that adsorption is influenced by the interaction of TCE with functional groups of the coal surface. The efficiency of TCE adsorption on various active carbons at a constant flow rate was studied. It was shown that a decrease in the flow rate of the solution through the filter increases the dynamic adsorption capacity, which indisputably confirms the pore-diffusion inhibition of mass transfer.

Keywords: adsorption, dynamics, active coal, trichloroethylene

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-30-35

В поверхностных и подземных источниках питьевого водоснабжения часто обнаруживается трихлорэтилен (ТХЭ) вследствие широкого применения его в разных отраслях промышленности в технологическом цикле (при производстве хладагентов, гербицидов, красителей, растворов источников или кислот). Также источником загрязнения гидросферы ТХЭ могут выступать несанкционированные свалки, фильтрат которых, проникая через слои почвы, попадает в грунтовые воды. Классическая технология водоподготовки не всегда обеспечивает очистку

воды от органических соединений вследствие сезонного изменения состава воды и при нарушении технологии. Кроме того, в процессе подготовки воды существует вероятность образования еще более опасных вторичных токсичных контаминантов. При обеззараживании воды из природных водоемов хлорсодержащими реагентами хлор взаимодействует с природными органическими веществами, образуя галогенорганические соединения, в том числе ТХЭ. Трихлорэтилен чрезвычайно опасен для водных организмов и может вызвать значительные из-

менения в экосистеме. Согласно Гигиеническим нормативам ГН 2.1.5.2280-07 ПДК трихлорэтилена в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 0,005 мг/дм³ [1]. Употребление воды, содержащей ТХЭ, относящийся к 1-му классу опасности, угрожает здоровью населения, так как данный контаминант является сильным наркотическим средством, приводящим к дыхательной недостаточности, нарушениям работы сердечно-сосудистой системы и центральной нервной системы. Присутствуя в воде в концент-

рациях, превышающих ПДК, ТХЭ оказывает общетоксическое, мутагенное и канцерогенное действие на организм человека [2, 3].

Наиболее перспективным направлением в технологии извлечения органических веществ из водных растворов является сорбционный способ с использованием активных углей (АУ) и полимерных сорбентов. Для создания адсорбционной технологии очистки природных вод от органических соединений необходимо провести комплексное исследование процесса адсорбции ТХЭ углеродными и полимерными сорбентами, включающее изучение равновесия, кинетики и динамики адсорбционного процесса [4].

Объекты исследования — промышленные активные угли на основе каменного угля марок СКД-515, АГ-3, АГ-ОВ-1, КАД-йодный, древесного угля — БАУ, на основе абрикосовых косточек — КАУ (производитель ОАО "Сорбент", г. Пермь), кокосовый активный уголь КсАУ ("Eurocarb", Великобритания), полукоксы марок АБГ (производитель ЗАО "Карбоника-Ф", г. Красноярск) и Пуrolат-стандарт (ОАО "Синтез", г. Ростов-на-Дону), сорбент на основе полимерной фенолформальдегидной смолы — ПФС (производитель ОАО "Сорбент", г. Пермь), отличающиеся природой, способом получения, пористой структурой и величиной удельной поверхности [5].

Определение ТХЭ в водных растворах проводили согласно стандартной методике методом газовой хроматографии с детектором электронного захвата [6]. Равновесие адсорбции ТХЭ углеродными сорбентами исследовалось в диапазоне концентраций $2,0 \cdot 10^{-4}$ – $2,0$ ммоль/дм³. Время достижения адсорбционного равновесия было определено в статических условиях отдельной серией опытов и не превышало 24 ч.

Одним из основных критериев оценки свойств адсор-

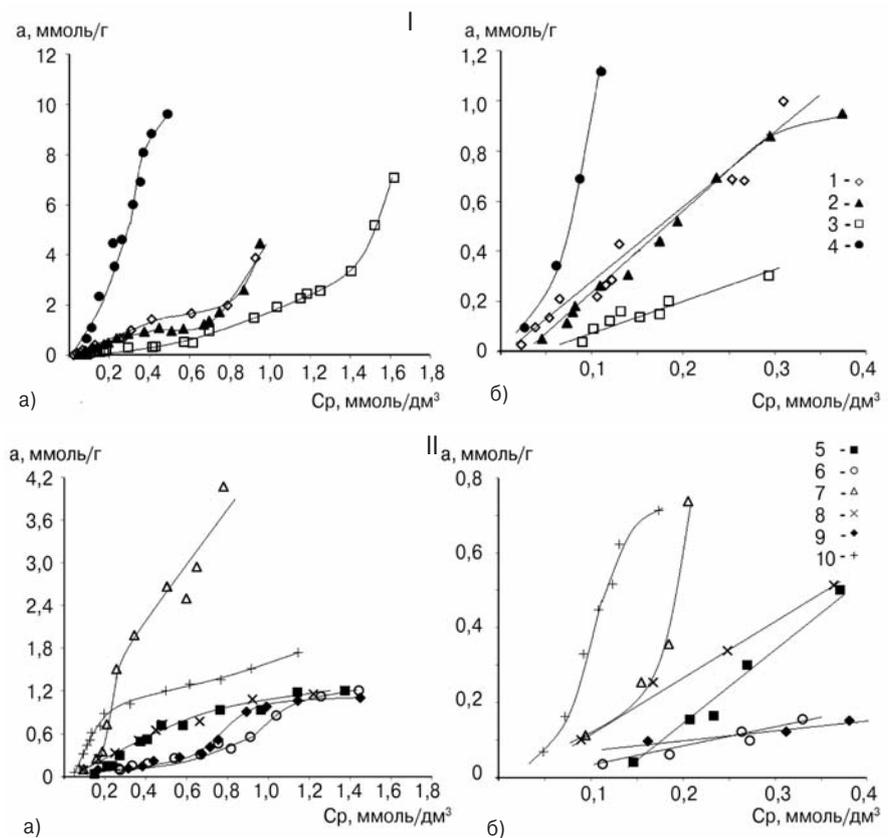


Рис. 1. Изотермы адсорбции ТХЭ гранулированными (I) и дробленными (II) АУ в широком интервале концентраций (а) и на начальном участке (б):
1 – АГ-3; 2 – СКД-515; 3 – АГ-ОВ-1; 4 – ПФС; 5 – АБГ; 6 – БАУ; 7 – КсАУ; 8 – КАД-йодный; 9 – Пуrolат-Стандарт; 10 – КАУ

Fig. 1. The adsorption isotherms of TCE granulated (I) and crushed (II) AC in a wide range of concentrations (a) and in the initial section (b):
1 – AG-3; 2 – SKD-515; 3 – AG-OV-1; 4 – SFC; 5 – ABG; 6 – BAU; 7 – KsAU; 8 – CAD-iodine; 9 – Purolat Standard; 10 – KAU

бентов являются изотермы адсорбции, позволяющие определить зависимость активности адсорбента (адсорбционной емкости в пересчете на граммы или метры квадратные сорбента) от концентрации адсорбтива в условиях равновесия [7, 8]. Экспериментальные изотермы адсорбции ТХЭ из водных растворов представлены на рис. 1.

Установлено, что адсорбционная емкость углеродных сорбентов по отношению к ТХЭ уменьшается в ряду ПФС > КсАУ > АГ-3 ≥ КАУ ≥ СКД-515 > КАД-йодный ≥ АБГ > АГ-ОВ-1 > БАУ ≥ Пуrolат-Стандарт. Анализ начальных участков полученных изотерм позволил отнести их к изотермам S-типа по классификации Гильса [7]. Такая форма изотерм подразумевает, что взаимодействие между молекулами

ТХЭ превышает по силе взаимодействие ТХЭ — поверхность АУ. Кроме того, в исследованном интервале концентраций (до величины предельной растворимости трихлорэтилена) для АУ марок ПФС и КсАУ насыщение монослоя компонентом не достигается (S1-изотермы), а для АУ марок АГ-3, АГ-ОВ-1 и СКД-515 в области высоких равновесных концентраций начинается либо переориентация молекул адсорбата на поверхности АУ, либо формирование второго слоя компонента (S3-изотермы).

Для более полной характеристики исследуемых адсорбентов и расчета основных адсорбционных параметров были применены теории, обобщенные для случая адсорбции из растворов ограниченно растворимых веществ: мономолекулярной адсорбции (модели

Таблица 1. Параметры адсорбции ТХЭ гранулированными и дроблеными активными углями по методу полимолекулярной адсорбции
Table 1. The parameters of the adsorption of TCE granular and crushed active carbons by the method of polymolecular adsorption

Марка АУ	a_{\max} , ммоль/г	K	$-\Delta Q$, кДж/моль	S, м ² /г	R ²
Гранулированные					
АГ-3	2,96	1,79	2,50	1124 (320*)	24,88
СКД-515	2,73	1,44	2,17	1038 (296*)	4,28
АГ-ОВ-1	1,10	1,66	2,38	418	14,63
ПФС	-1,38	-1,41	-	-	44,92
Дробленые					
АБГ	0,55	6,69	4,97	210	64,69
БАУ	0,66	1,23	1,95	250	8,28
КАУ	0,96	10,8	6,02	365	79,85
КсАУ	-4,07	-2,70	-4,64	-	32,57
КАД	0,60	8,50	5,48	228	82,85
Пуролат	1,16	0,64	1,20	441	9,20

*При ориентации молекулы перпендикулярно поверхности АУ.

Таблица 2. Параметры адсорбции ТХЭ гранулированными и дроблеными активными углями по методу ТОЗМ
Table 2. Parameters of adsorption of TCE by granular and crushed active carbons according to the TOZM method

Марка АУ	a_0 , ммоль/г	a_0 , мкмоль/м ²	w_0 , см ³ /г	E, кДж/моль	χ , нм	R ²
Гранулированные						
АГ-3	2,27	4,20	0,20	5,10	2,40	95,17
СКД-515	1,82/12,3	2,30/15,64	0,16/1,11	4,92/1,73	2,49/7,09	98,76/95,37
АГ-ОВ-1	0,66/4,69	0,97/6,87	0,06/0,42	5,17/1,92	2,37/6,39	95,71/89,97
ПФС	20,26	19,54	1,81	4,15	2,95	98,79
Дробленые						
АБГ	1,55	3,69	0,14	3,53	3,46	96,05
БАУ	0,51/1,44	0,87/2,48	0,04/0,13	3,97/2,15	3,08/5,69	96,23/94,68
КАУ	7,90/1,64	9,60/2,00	0,71/0,15	4,13/6,70	2,96/1,83	99,46/96,67
КсАУ	6,04	3,99	0,54	3,66	3,34	95,55
КАД	1,20	1,82	0,11	4,74	2,58	99,11
Пуролат	0,37/1,57	1,19/5,05	0,03/0,14	4,84/2,21	2,48/5,43	82,98/90,13

Примечание. В числителе – область низких концентраций ТХЭ, в знаменателе – область высоких концентраций ТХЭ.

Фрейндлиха, Ленгмюра), полимолекулярной адсорбции (модель БЭТ) и объемного заполнения микропор – ТОЗМ (модель Дубинина-Радушкевича). Все изотермы адсорбции трихлорэтилена проанализированы в соответствующих координатах. Рассчитанные адсорбционные параметры и коэффициенты корреляции моделей (R²) приведены в табл. 1, 2.

Согласно расчетам, с высокой степенью корреляции (R² > 90 %) адсорбционное поведение трихлорэтилена описывается моделями Фрейндлиха и ТОЗМ на всех исследованных АУ. Остальные модели для описания адсорбции ТХЭ использоваться не могут.

Рассчитанные значения характеристической энергии адсорбции (E) и, соответственно, полуширины заполняемых компонентом пор (χ) (см. табл. 2) позволяют предположить, что адсорбция ТХЭ протекает преимущественно не в микропорах, а в мезопорах.

Для оптимизации процесса адсорбции важно знать лимитирующую стадию массопереноса, которая позволит рассчитать коэффициент массопереноса. Изучение процесса адсорбции в кинетически условиях дает возможность определить как лимитирующую стадию массопереноса, так и коэффициент массопереноса.

По данным кинетических исследований установлено, что лимитирующей стадией процесса извлечения ТХЭ из воды является внешний массоперенос. Рассчитаны коэффициенты внешнего массопереноса, необходимые для инженерных расчетов.

Полученная в ходе эксперимента первичная информация о скорости адсорбции, т.е. о скорости насыщения гранулы адсорбатом, представлена кинетическими кривыми (рис. 2), характеризующими изменение величины адсорбции во времени. Анализ кинетических кривых показал, что для всех исследуемых образцов активных

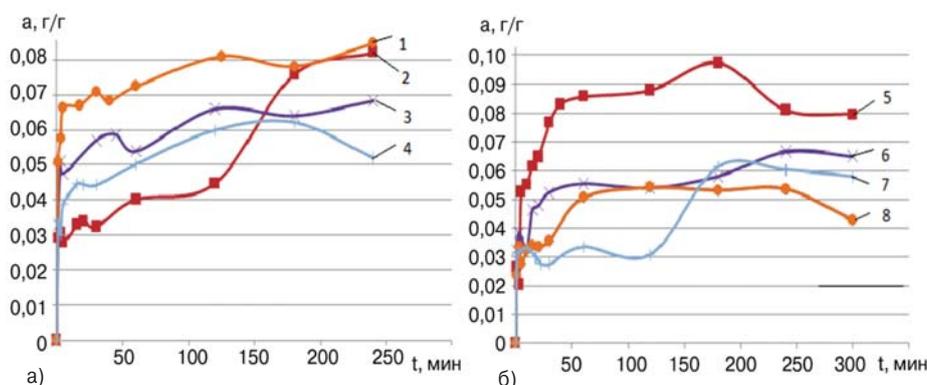


Рис. 2. Кинетические кривые адсорбции трихлорэтилена углеродными сорбентами марок:
 а: 1 – КсАУ; 2 – АГ-ОВ; 3 – Пуролат-Стандарт; 4 – КАУ; б: 5 – ПФС; 6 – СКД-515; 7 – БАУ; 8 – АБГ
Fig. 2. Kinetic curves of trichloroethylene adsorption by carbon sorbents of the following grades:
 а: 1 – KsAU; 2 – AG-OV; 3 – Purolat-Standard; 4 – KAU; б: 5 – SFC; 6 – SKD-515; 7 – BAU; 8 – ABG

углей равновесие в адсорбционной системе достигается в течение 50–200 мин в зависимости от марки угля.

Кинетические кривые проанализированы в координатах γ от τ [9], что позволяет выяснить модель структуры гранул активных углей, так как для изучения кинетики адсорбции необходимо учитывать, к какой из моделей (квазигомогенной или бипористой) относятся зерна сорбента. Начальный участок зависимости степени достижения адсорбционного равновесия от времени носит прямолинейный характер вплоть до $\gamma = 0,4-0,9$. Высокие значения γ на прямолинейном участке предполагают соответствие гранул используемых сорбентов квазигомогенной модели, следовательно зерно адсорбента рассматривается как система, образованная беспорядочным переплетением микро- и мезопор, в которой невозможно разграничить участки, имеющие только или преимущественно мезопоры, и участки, содержащие только микропоры.

Был рассчитан безразмерный кинетический параметр T по формуле $\gamma = 1 - e^{-T}$.

Зависимости величин T от τ является теоретической кинетической кривой и представляют собой прямую, проходящую через начало координат, свидетельствуя о том, что на этом этапе процесс адсорбции лимитируется внешним массопереносом в течение 5–40 мин в зависимости от свойств активного угля.

За непродолжительное время степень достижения адсорбционного равновесия γ составила 0,4–0,9. Следовательно, до этих значений γ адсорбция ТХЭ протекает внутри зерна настолько быстро, что не оказывает влияния на общую скорость массопереноса [10]. 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.

Полученные данные позволяют предположить, что внешненидиффузионный массоперенос контролирует скорость и является лимитирующей стадией адсорбционного процесса для системы активный уголь – водный раствор ТХЭ в начальный момент сорбционного извлечения [10, 11].

Представленные ниже значения коэффициентов внешнего массопереноса β_n для всех исследуемых марок углеродных сорбентов имеют достаточно высокие значения, что позволяет ожидать высокую скорость извлечения компонента из очищаемой воды при фильтровании через неподвижный слой сорбента. Значения β_n для сорбентов марок ПФС и Пуrolат-Стандарт, в сравнении с другими изучаемыми марками сорбентов, отличаются, что, вероятно, связано с развитой системой транспортных пор (макро- и мезопор) для активных углей этих марок, количеством кислородсодержащих поверхностных функциональных групп и сырья [12], используемого для производства сорбента, так как на миграцию вещества из объема 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, и зависящие от исходного сырья и способа получения сорбента [1, 12].

Коэффициенты внешнего массопереноса β_n , с^{-1} , ТХЭ в системе АУ – вода – ТХЭ: 0,2517 Пуrolат-Стандарт; 0,0293 СКД-515; 0,0308 КсАу; 0,2607 ПФС; 0,0282 АГ-ОВ; 0,0411 КАУ; 0,0366 АБГ; 0,0137 БАУ.

Рассчитанные по результатам исследования кинетики коэффициенты массопереноса необходимы для инженерного расчета промышленной адсорбционной колонны.

Также были выполнены экспериментальные исследования процесса извлечения ТХЭ в непрерывном режиме с использованием активного угля марки АБГ.

С целью оптимизации процесса непрерывной очистки водных растворов была изучена возможность математического моделирования динамики для системы водный раствор ТХЭ – углеродный сорбент. В основу теоретических расчетов выходных кривых положены фундаментальные уравнения внешненидиффузионной динамики адсорбции [13] для случая

$$\text{линейной изотермы } \sqrt{\tau} = \sqrt{a_0/(wC_0)} \sqrt{H - b\sqrt{a_0}/(\beta_n C_0)}, \quad (1)$$

$$\text{вогнутой изотермы } \tau = a_0/(wC_0)[H - w/\beta_n(\ln C_0/C - 1)], \quad (2)$$

$$\text{изотермы Ленгмюра } \tau = a_0/(vC_0)\{L - w/\beta_n[1/p \ln(C_0/C - 1) + \ln C_0/C - 1]\}, \quad (3)$$

где τ – продолжительность адсорбции, с; w – скорость потока, отнесенная к полному сечению аппарата, м/с; H – высота слоя активного угля, м; C_0 – начальная концентрация адсорбируемого вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$; a_0 – количество адсорбированного вещества, равновесное с

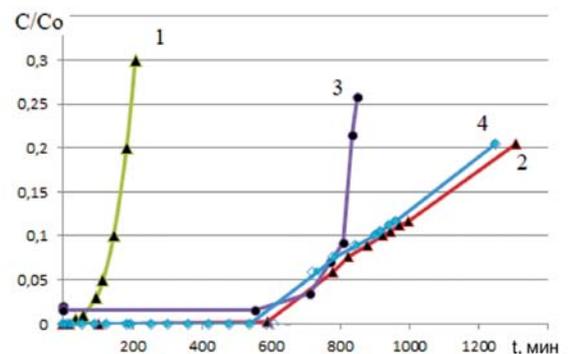


Рис. 3. Выходные кривые адсорбции трихлорэтилена для плотного слоя активного угля АБГ: 1–3 – рассчитанные по фундаментальным уравнениям внешненидиффузионной динамики адсорбции; 4 – экспериментальная [13]

Fig. 3. The output curves of trichloroethylene adsorption for a dense layer of active carbon ABG: 1–3 – calculated according to the fundamental equations of the external diffusion dynamics of adsorption; 4 – experimental [13]

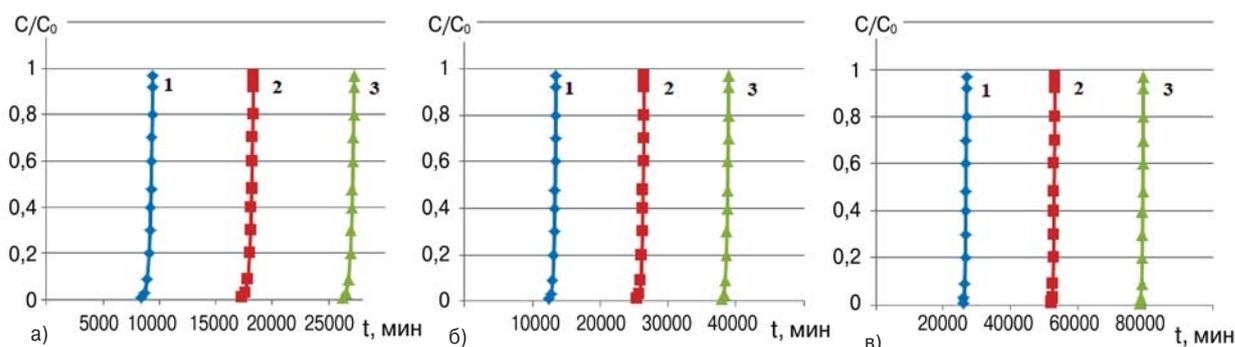


Рис. 4. Выходные кривые системы водный раствор ТХЭ АУ марки АБГ при $L = 1$ (1), 2 (2), 3 (3) и скорости потока $v = 7$ м/ч (а), 5 (б) и 2,5 м/ч (в)

Fig. 4. The output curves of the aqueous solution system of TCE AC ABG brand at $L = 1$ (1), 2 (2), 3 (3) and the flow velocity $v = 7$ m/h (a), 5 (b) and 2.5 m/h (c)

концентрацией потока C_0 , кг/м³ (берется по изотерме адсорбции в кг/кг и умножается на насыпную плотность угля в кг/м³); β_n — коэффициент внешнего массопереноса, с⁻¹; $b = \Phi^{-1}(1 - C/0,54C_0)$; Φ^{-1} — функция обратная функции Крампса; $P = C/C_{0,5}$, $C_{0,5}$ — содержание поглощаемого вещества в потоке, равновесное с количеством вещества, равным половине.

Критерием применимости одного из фундаментальных уравнений внешнедиффузионной динамики адсорбции для расчетов служит совпадение экспериментальных и рассчитанных динамических кривых (при заданных параметрах извлечения) [14]. На рис. 3 приведены рассчитанные выходные кривые (1–3) с экспериментально полученной кривой (4) для неподвижного фильтрующего слоя сорбента марки АБГ длиной 0,15 м и средней скорости потока 7 м/ч. Можно отметить, что кривая, рассчитанная по фундаментальному уравнению внешнедиффузионной динамики адсорбции в области малых концентраций для вогнутой изотермы, имеет одинаковую форму с экспериментальной кривой. Кривые 2 и 4 (рис. 3) удовлетворительно коррелируются в пределах ошибки эксперимента, что подтверждает правомерность предложенного подхода к моделированию адсорбции и возможность определения динамических характеристик ад-

сорбции без дополнительного проведения экспериментальных исследований на основе уравнения внешнедиффузионной динамики адсорбции в области малых концентраций для вогнутой изотермы.

Выходные кривые на примере системы водный раствор ТХЭ — АУ марки АБГ при различных параметрах фильтрующего слоя и режима сорбции рассчитаны и приведены на рис. 4. С увеличением длины фильтрующего слоя от 1 до 3 м время работы слоя до проскока ТХЭ в фильтрат увеличивается, с увеличением скорости потока от 2,5 до 7 м/ч — уменьшается (рис. 4). Минимальное время работы фильтрующего слоя до проскока ТХЭ достигается при $L = 1$ м, $v = 7$ м/ч, а максимальное при $L = 3$ м, $v = 2,5$ м/ч.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Для создания адсорбционной технологии очистки природных вод от органических соединений проведено комплексное исследование процесса адсорбции ТХЭ углеродными и полимерными сорбентами. Установлены закономерности, особенности и механизм адсорбции трихлорэтилена на сорбентах, отличающихся составом, способом получения, структурой и химическим состоянием поверхности. Показано, что адсорбционная емкость углеродных адсорбентов по отношению к ТХЭ уменьшается в ряду ПФС > КсАУ >

АГ-3 ≥ КАУ ≥ СКД-515 > КАД-йодный ≥ АБГ > АГ-ОВ-1 > БАУ ≥ Пуrolат-Стандарт. По результатам исследования процесса адсорбции в кинетических условиях установлен механизм массопереноса в системах АУ — водный раствор ТХЭ и показано влияние структуры углей на условия переноса. Внешнедиффузионный механизм и полученные кинетические параметры позволяют ожидать высокую скорость извлечения компонента из очищаемой воды при фильтрации через неподвижный слой сорбента, с целью максимального использования емкости слоя сорбента можно рекомендовать снижение скорости фильтрования по мере отработки угольного фильтра. Получены коэффициенты массопереноса, необходимые для инженерных расчетов.

Предложен метод оптимизации параметров и режимов непрерывной адсорбционной очистки на основе уравнения внешнедиффузионной динамики адсорбции в области малых концентраций для вогнутой изотермы.

Разработанная технология адсорбционной доочистки воды от ТХЭ с использованием АУ может быть реализована на основе серийно выпускаемого отечественного оборудования. Внедрение адсорбционной технологии извлечения ТХЭ обеспечит охрану окружающей среды и ресурсосбережение.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания "Инициативные научные проекты" 19.4713.2017/БЧ.

Литература

1. **ГН 2.1.5.2280-07.** Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно -питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 11 с.
2. **Куценко С.А.** Основы токсикологии. М., Фолиант, 2004. 570 с.
3. **Baytak D., Sofuoglu A., Inal F., Sofuoglu S.C.** Seasonal variation in drinking water concentrations of disinfection by-products in IZMIR and associated human health risks. *Science of The Total Environment*. 2008. Vol. 407 (1). P. 286–296.
4. **Краснова Т.А., Тимошук И.В., Горелкина А.К., Гора Н.В.** Адсорбционные технологии очистки воды при производстве фруктово-сывороточных напитков. *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 10. С. 4–10.
5. **Щипко М.Л., Еремина А.О., Головина В.В.** Адсорбенты из углеродсодержащего сырья Красноярского края. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry 2*. 2008. № 1. С. 166–180.
6. **ГОСТ Р31951-2012** Вода питьевая. Определение содержания летучих галогенорганических соединений газожидкостной хроматографией. М., Стандартинформ, 2013. 20 с.
7. **Парфит Г., Рочестер К.** Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел. М., Мир, 1996. С. 488.
8. **Radovic L.R., Silva I.F., Ume J.I. and ath.** 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. Vol. 35. № 9. P. 1339–1348.
9. **Краснова Т.А., Горелкина А.К., Тимошук И.В., Гора Н.В.** Кинетика сорбционного извлечения трихлорэтилена из водных растворов активными углями. *Вода: химия и экология*. 2019. № 1. С. 4–11.
10. **Анурова С.А.** Кинетика адсорбции автомобильных расходных жидкостей из водной среды. *Вода: химия и экология*. 2012. №6. С. 70–75.
11. **Тимофеев Д.П.** Кинетика адсорбции. М., Изд-во АН СССР, 1962. С. 252.
12. **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.
13. **Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Рода И.Г.** Адсорбция органических веществ из воды. Л., Химия, 1990. 256 с.
14. **Ларин А.В., Поляков Н.С.** Выходные кривые динамики адсорбции в зависимости от констант уравнения изотермы адсорбции Дубинина-Радускевича. *Журн. физ. химии*. 1996. Т. 70. № 1. С. 128–131.

References

1. **GN 2.1.5.2280-07.** Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob"ektov khozyaistvenno -pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya: Gigienicheskie normativy. M., Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2008. 11 s.
2. **Kutsenko S.A.** Osnovy toksikologii. M., Foliant, 2004. 570 s.
3. **Baytak D., Sofuoglu A., Inal F., Sofuoglu S.C.** Seasonal variation in drinking water concentrations of disinfection by-products in IZMIR and associated human health risks. *Science of The Total Environment*. 2008. Vol. 407 (1). P. 286–296.
4. **Krasnova T.A., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Gora N.V.** Adsorbtsionnye tekhnologii oshistki vody pri proizvodstve fruktovo-syvorotochnykh napitkov. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. T. 22. № 10. S. 4–10.
5. **Shchipko M.L., Eremina A.O., Golovina V.V.** Adsorbenty iz uglerodsoderzhashchego syr'ya Krasnoyarskogo kraya. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry 2*. 2008. № 1. S. 166–180.
6. **GOST R31951-2012** Voda pit'evaya. Opredelenie soderzhaniya letuchikh galogenorganicheskikh soedinenii gazozhidkostnoi khromatografiei. M., Standartinform, 2013. 20 s.
7. **Parfit G., Rochester K.** Adsorbtsiya iz rastvorov na poverkhnostyakh tverdykh tel. M., Mir, 1996. S. 488.
8. **Radovic L.R., Silva I.F., Ume J.I. and ath.** 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. Vol. 35. № 9. P. 1339–1348.
9. **Krasnova T.A., Gorelkina A.K., Timoshchuk I.V., Gora N.V.** Kinetika sorbtsionnogo izvlecheniya trikhloretilena iz vodnykh rastvorov aktivnymi uglyami. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2019. № 1. S. 4–11.
10. **Anurova S.A.** Kinetika adsorbtsii avtomobil'nykh raskhodnykh zhidkostey iz vodnoi sredy. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2012. №6. S. 70–75.
11. **Timofeev D.P.** Kinetika adsorbtsii. M., Izd-vo ANSSSR, 1962. S. 252.
12. **Fedotkin I.M., Koganovskii A.M., Roda I.G., Marutovskii R.M.** Ob opredelenii koeffitsienta vneshnego massoobmena i adsorbtsii iz rastvorov. *Fizicheskaya khimiya*. 1994. T. 48. № 2. S. 473–475.
13. **Koganovskii A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M., Roda I.G.** Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody. L., Khimiya, 1990. 256 s.
14. **Larin A.V., Polyakov N.S.** Vykhodnye krivye dinamiki adsorbtsii v zavisimosti ot konstant uravneniya izotermiy adsorbtsii Dubinina-Radushkevicha. *Zhurn. fiz. khimii*. 1996. T. 70. № 1. S. 128–131.

А.К. Горелкина – канд. хим. наук, ст. преподаватель, Кемеровский государственный университет, 650056 Россия, г. Кемерово, б-р Строителей 47, e-mail: ecolog1528@yandex.ru • Т.А. Краснова – д-р техн. наук, профессор • И.В. Тимошук – д-р техн. наук, профессор • Н.В. Гора – канд. техн. наук, ст. преподаватель • Н.С. Голубева – канд. техн. наук, доцент

A.K. Gorelkina – Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer, Kemerovo State University, 650056 Russia, Kemerovo, Boulevard Stroiteley 47, e-mail: ecolog1528@yandex.ru • T.A. Krasnova – Dr. Sci. (Eng.), Professor • I.V. Tymoshchuk – Dr. Sci. (Eng.), Professor • N.V. Gora – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer • N.S. Golubeva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor