

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДООЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

**И.В. Тимошук, В.В. Шишкин,  
Т.А. Краснова, М.П. Кирсанов**

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности  
*бульвар Строителей, 47, Кемерово, Россия, 650056*

Проведено исследование адсорбции смеси хлорфенола и хлороформа на активных углях (АУ), отличающихся природой, структурой, удельной поверхностью. Установлены основные закономерности, особенности и механизм адсорбции органических компонентов на АУ. Показан механизм массопереноса при адсорбции смеси хлорфенола и хлороформа. Определены основные адсорбционные и кинетические параметры. Предложена модель для оптимизации процесса адсорбции смеси.

На основе комплекса исследований по равновесию, кинетике и динамике адсорбции хлорфенола и хлороформа при их совместном присутствии из водных растворов на активных углях АГ-3 и СКД-515 и инженерных расчетов разработана технология сорбционной очистки питьевой воды.

**Ключевые слова:** адсорбция, органические компоненты, механизм массопереноса.

В настоящее время проблема обеспечения населения качественной и безопасной для здоровья человека питьевой водой приобретает социальную значимость. Периодически в природной воде обнаруживаются фенол, а также другие органические соединения. В процессе обеззараживания питьевой воды хлорагентами фенолы трансформируются в более токсичные соединения — хлорфенолы. Образование таких соединений является серьезной проблемой водоподготовки, так как повышенное содержание этих веществ ухудшает ее органолептические показатели, вызывает появление специфического запаха. При этих же условиях из гумусовых соединений образуется хлороформ. Присутствие хлороформа в воде негативно сказывается на здоровье человека: приводит к болезням печени и почек, нарушению работы желудочно-кишечного тракта, центральной нервной системы, онкологическим заболеваниям. Хлорфенольные соединения относятся к наиболее токсичным органическим веществам и отличаются стабильностью, при попадании в организм могут вызвать судороги, индуцировать лейкемию, а также обладают мутагенными и канцерогенными свойствами [1].

Одним из перспективных направлений в производстве чистой воды является ее локальная доочистка в системе централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения с применением АУ. Эффективность адсорбционной очистки воды от органических соединений АУ определяется по совокупности исследований равновесия, кинетики и динамики адсорбционного процесса. Работы в этом направлении практически не проводятся.

Для разработки технологии очистки питьевой воды, содержащей после первичного хлорирования хлороформ и хлорфенол, было выполнено комплексное исследование адсорбции хлороформа и хлорфенола из их смеси на АУ СКД-515 и АГ-3.

Одним из основных критериев оценки адсорбционных свойств исследуемых сорбентов являются изотермы адсорбции. Сопоставление изотерм адсорбции хлорфенола и хлороформа из их смеси в водном растворе с изотермами адсорбции из их индивидуальных водных растворов показало, что из смеси каждый из компонентов адсорбируется слабее, чем из его индивидуального водного раствора. Причем адсорбция хлороформа выше, чем адсорбция хлорфенола, что, вероятно, связано с его меньшей растворимостью в воде ( $C_{S_{\text{хлорфенола}}} = 210,8$  ммоль/дм<sup>3</sup>,  $C_{S_{\text{хлороформа}}} = 68,67$  ммоль/дм<sup>3</sup>), а также меньшим по сравнению с хлорфенолом ван-дер-ваальсовским размером молекулы — 0,64 нм хлороформа, 0,8 нм — хлорфенола.

Для более полной характеристики углеродных сорбентов и расчета адсорбционных параметров использовали теории мономолекулярной адсорбции (уравнения Фрейндлиха и Ленгмюра), теорию объемного заполнения микропор (уравнение Дубинина—Радушкевича, модифицированное для случая адсорбции из водного раствора) и обобщенную теорию полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ) [2]. Все изотермы адсорбции проанализированы в соответствующих координатах линеаризации данных уравнений.

Установлено, что уравнение Фрейндлиха и БЭТ не могут быть применены для описания адсорбционного равновесия в системе «вода — хлорфенол — хлороформ — АУ» в связи с большим отклонением рассчитанных изотерм адсорбции от экспериментальных. Изотермы адсорбции, рассчитанные по уравнениям Дубинина—Радушкевича и Ленгмюра, хорошо согласуются с экспериментально полученными, и свидетельствуют о возможности применения данных уравнений для расчета равновесных параметров сорбции в системе «АУ — вода — хлорфенол — хлороформ». Рассчитаны основные адсорбционные параметры, необходимые для инженерных расчетов.

По данным кинетических исследований установлено, что лимитирующей стадией процесса извлечения малых концентраций органических веществ из воды (хлорфенола, хлороформа) является внешний массоперенос. Рассчитаны коэффициенты внешнего массопереноса, необходимые для инженерных расчетов.

Экспериментальное изучение динамики сорбции 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. Исследование динамики адсорбции хлороформа и хлорфенола из воды на АУ проводилось в колоннах с высотой слоя загрузки от 0,1 до 0,5 м, и скоростью потока от 1 до 5 м/ч. Установлено, что при существующем в водопроводной воде соотношении компонентов во время проскока хлорфенол выходит с концентрацией значительно меньше ПДК, что позволяет моделировать процесс сорбции в динамических условиях для доминирующего компонента — хлороформа.

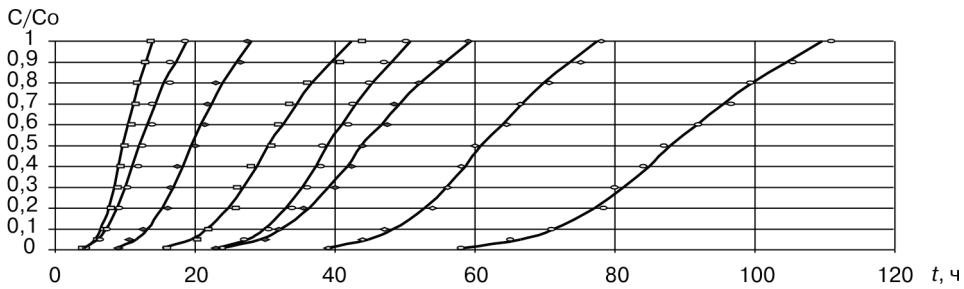
Для решения вопроса оптимизации режимов работы и параметров промышленной установки процесса адсорбции было использовано математическое моделирование на основе фундаментального уравнения внешнедиффузионной

динамики адсорбции в области малых концентраций [3] с использованием констант уравнения Дубинина—Радушкевича и кинетических данных:

$$\tau = \frac{a_o}{vC_o} \cdot \left[ L - \frac{v}{\beta_n} \cdot \left( \ln \frac{C_o}{C} - 1 \right) \right],$$

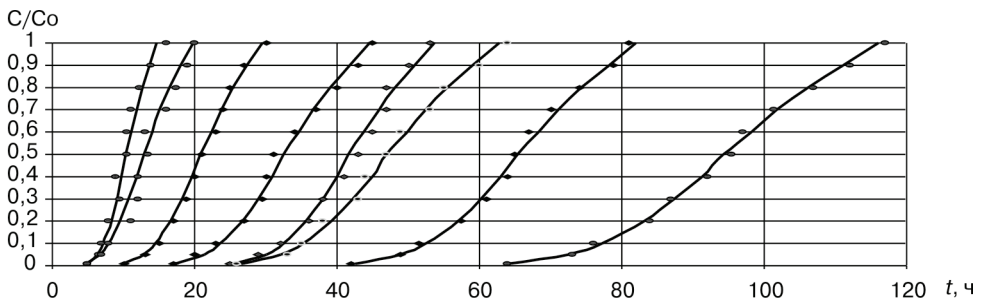
где  $\tau$  — время работы слоя длиной  $L$  до появления проскоковой концентрации сорбируемого вещества  $C$ ;  $C_o$  — начальная концентрация вещества в потоке, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $a_o$  — содержание вещества в неподвижной фазе, равновесное с  $C_o$ , ммоль/кг;  $\beta$  — коэффициент внешнего массопереноса, сек<sup>-1</sup>.

Моделирование выполнено для процесса адсорбционной очистки питьевой воды от хлороформа и хлорфенола с использованием активных углей марок АГ-3 и СКД-515. Рассчитаны основные параметры адсорбции хлороформа (в присутствии хлорфенола) в динамических условиях. По результатам расчета получены зависимости концентрации хлороформа в фильтрате от времени адсорбции на углеродных сорбентах при различных параметрах фильтрующего слоя и режимах динамики сорбции. На рисунках 1, 2 представлены выходные кривые, характеризующие зависимость времени работы фильтрующего слоя до проскока хлорфенола в фильтрат от марки угля при разных параметрах.



**Рис. 1.** Выходные кривые динамики адсорбции хлороформа (в присутствии хлорфенола) для плотного слоя активного угля СКД-515 при разных скорости потока ( $v$ ) и высоты слоя сорбента ( $H$ ),  $C_o = 0,15$  мг/дм<sup>3</sup>:

1 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 1$  м; 2 —  $v = 8$  м/ч,  $H = 2$  м; 3 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 2$  м; 4 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 2,5$  м; 5 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 2$  м; 6 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 3$  м; 7 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 2,5$  м; 8 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 3$  м; (○) — экспериментальные, (●) — теоретические



**Рис. 2.** Выходные кривые динамики адсорбции хлороформа (в присутствии хлорфенола) для плотного слоя активного угля АГ-3 при разных скорости потока ( $v$ ) и высоты слоя сорбента ( $H$ ),  $C_o = 0,15$  мг/дм<sup>3</sup>:

1 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 1$  м; 2 —  $v = 8$  м/ч,  $H = 2$  м; 3 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 2$  м; 4 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 2,5$  м; 5 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 2$  м; 6 —  $v = 5$  м/ч,  $H = 3$  м; 7 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 2,5$  м; 8 —  $v = 2,5$  м/ч,  $H = 3$  м; (○) — экспериментальные, (●) — теоретические

Совпадение экспериментальных и теоретических выходных кривых адсорбции хлороформа (в присутствии хлорфенола) на активных углях АГ-3 и СКД-515 свидетельствует о том, что используемое уравнение практически полностью описывает экспериментальные выходные кривые и подтверждает правомерность предложенного подхода к моделированию адсорбции.

По результатам расчета получены динамические характеристики процесса адсорбции: длина рабочего слоя, длина неиспользованного слоя, коэффициент защитного действия, продолжительность работы колонны и количество очищаемой воды в зависимости от скорости фильтрования, высоты неподвижного слоя и размеров колонны. Можно отметить, что время работы фильтрующего слоя до проскока уменьшается в ряду: АГ-3 — СКД-515.

Экспериментальные результаты подтверждают возможность моделирования процесса адсорбции. Инженерные расчеты для практической адсорбционной установки можно проводить по доминирующему компоненту. Проведенные исследования позволяют рекомендовать аппаратное оформление адсорбционной доочистки водопроводной воды.

На основании теоретических и экспериментальных исследований процесса адсорбции разработана технология доочистки водопроводной воды, содержащей смесь хлороформа и хлорфенола, которая внедрена на водоподготовительных сооружениях поселка шахты Ягуновская.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Грушко. Я.Н.* Вредные органические соединения в промышленных сточных водах: Справочник. — Л., 1982.
- [2] *Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М.* Адсорбция органических веществ из воды. — Л.: Химия, 1990.
- [3] *Ларин А.В.* // Изв. АН СССР, серия Химия. — 1987. — № 10. — С. 2333—2335.

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF DRINKING WATER AFTER PURIFICATION FROM ORGANIC SUBSTANCES

**I.V. Timoschuk, V.V. Shishkin,  
T.A. Krasnova, M.P. Kirsanov**

*Kemerovo Technological Institute of Food Industry  
Boulevard Builders, 47, Kemerovo, Russia, 650056*

Complex of investigation of adsorption a chlorphenol and chloroform by their compatibility in the presences from waters by activated carbon AG-3 and SKD-515 are different by nature, structure, size specific gravity of surface was studied.

The fundamental laws, peculiarity and machinery of organic components was established. Machinery of mass-transfer by adsorption of chlorphenol and chloroform mixture was showed. The main adsorption and kinetic parameters was defined. A model for balance of process adsorption of mixture consist from range of study about equilibrium, kinetics and dynamics adsorption of chlorphenol and chloroform in front of solution from water with activated carbon AG-3 and SKD-515, and calculation of engineering was suggested. The technology of adsorption purification drinking water was developed.

**Key words:** process of adsorption, activated carbon, chlorphenol, chloroform, drinking water.