

характеристик каждого из элементов позволит свести теплопотери к минимуму.

#### Список литературы

1. Малявина Е. Г. Теплопотери здания: справочное пособие / Е. Г. Малявина. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.
2. Бушо А. В. Факторы, определяющие температурный режим стеклопакетов в краевых зонах // Вестник МГСУ. 2011. №1-1. С. 64–69.
3. Кривошеин А.Д., Пахотин Г.А. Результаты испытаний теплового режима стеклопакетов с дистанционными рамками типа «Swiggle strip», «TPS», «Thermix» // Окна и двери. 2005. № 7. С. 40–43.
4. Энергоэффективность стеклопакетов: от А до Я // Оконные технологии. 2019. №75(1). С. 66–69. URL: <https://www.wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/866-75-1-2019.html> (дата обращения: 31.07.2020).
5. Влияние «теплого торца» стеклопакета на теплозащитные качества окон // Оконные технологии. 2007. №30(4). URL: <https://www.wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/51-30-4-2007.html> (дата обращения: 01.08.2020).
6. Бекман И. Н. МЕМБРАНЫ В МЕДИЦИНЕ: курс лекций. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010. URL: [http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm#Рекомендованная\\_литература](http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm#Рекомендованная_литература) (дата обращения: 01.08.2020).
7. Свойский В. З. Вязкость и теплопроводность газов в диапазоне температур от 100 до 2000 К. Ученые записки ЦАГИ, 1973, Т. 4, №1, С. 126-132.
8. Клыков И. А., Стратий П. В. Теоретические исследования теплотехнических свойств вакуумных стеклопакетов. Системные технологии. 2018. № 26. С. 221-228.
9. Степанова Л. Б. ПВХ-композиции с жидкими комплексными стабилизаторами на основе кальций-цинковых солей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Л. Б. Степанова; [Место защиты: Казан. нац. исслед. технол. ун-т]. Казань, 2013. 19 с.
10. Борискина И. В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Пром. и гражд. стр-во» направления подгот. дипломов. специалистов «Стр-во» / И. В. Борискина, А. А. Плотников, А. В. Захаров. [2-е изд., доп. и перераб.]. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2003. 310 с.
11. Энциклопедия полимеров [Текст]: [в 3 т.] / редкол.: В. А. Каргин - гл. ред. и др. - Москва: Советская энциклопедия, 1972 - 1977. Т. 1: А - К. 1972. 1224 стлб.
12. Корнев А. Е. Технология эластомерных материалов: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Химическая технология высокомолекулярных соединений и полимерных материалов» по специальности «Технология переработки пластических масс и эластомеров» / А. Е. Корнев, А. М. Буканов, О. Н. Швердяев; под ред. А. Е. Корнева. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Истек, 2009. 502 с.
13. Вольфсон С. И., Охотина Н. А., Панфилова О. А., Новикова Е. В., Миннегалиев Р.Р. Динамически вулканизированные термоэластопласты на основе смеси каучуков разной полярности и полипропилена // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №14. С. 90-92.
14. Абрамян С.Г., Власова М.П., Власов Р.А. Современные стеклопакеты для устройства светопрозрачных ограждающих конструкций // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_120\\_Abramian.pdf\\_66f9b1c5de.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_120_Abramian.pdf_66f9b1c5de.pdf) (дата обращения: 01.08.2020).
15. Майоров В. А. Оконные стекла – состояние и перспективы // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. №4. С. 559-573.
16. Богатова Т. В., Белохорт А. В. Теплосберегающие окна с низкоэмиссионным покрытием // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: высокие технологии. Экология. 2015. №1. С. 165-168.
17. Литвинова Н.А. Эффективное применение клапана приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха в многоэтажном строительстве // Инженерный вестник Дона. 2020. №3 (63). С. 25-38.
18. Мионов Е. Б., Шишарина А. Н. Анализ приточно-вытяжных установок с рекуперацией тепла // Вестник НГИЭИ. 2014. №12 (43). С. 58-64.

© А. Г. Зима

#### Ссылка для цитирования:

А. Г. Зима. Характеристики окна, влияющие на повышение его теплоизоляционных свойств // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. №3 (33). С. 40–47.

УДК 628.349.08:663.97

DOI: 10.35108/isvp20203(33)47-52

### МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СОРБЦИОННОЙ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТА

<sup>1</sup>Д. О.Игнаткина, <sup>1</sup>А. В. Москвичева, <sup>2</sup>А. А. Войтюк, <sup>1</sup>В. И. Салеева

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

<sup>2</sup>ООО «ОдинНаучСтройПроект», г. Волгоград, Россия

В данной статье авторами освещается одна из важных проблем в области охраны окружающей среды, а именно увеличение количества отходов в виде сточных вод (СВ), попадающих в водные объекты, чаще всего без требуемой степени очистки. Основной причиной развития обозначенной проблемы является стремительный рост промышленного производства. Авторами статьи был произведен литературный поиск эффективных и экономически оправданных способов очистки промышленных сточных вод. В статье приведены результаты исследований, доказывающие эффективность доочистки промышленных сточных вод сорбционным методом с использованием гранулированного композитного сорбента (ГКС), способ получения которого разработан сотрудниками кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ВолГТУ. В ходе проведения лабораторных экспериментов изучались процессы адсорбции загрязняющих веществ в статических и динамических условиях с применением нового фильтрующего материала, результаты экспериментов были отражены в виде выходных кривых поглощения. В статье представлены основные положения теории Ленгмюра, на основании которой авторами был произведен математический анализ полученных экспериментальных закономерностей при осуществлении процесса сорбционной доочистки промышленных сточных вод с применением ГКС.



**Ключевые слова:** сточные воды, гранулированный композитный сорбент, уравнение Ленгмюра.

**MATHEMATICAL ANALYSIS OF EXPERIMENTAL REGULARITIES OF THE PROCESS OF SORPTION AFTER TREATMENT OF WASTEWATER USING GRANULATED COMPOSITE SORBENT**

**<sup>1</sup>D. O. Ignatkina, <sup>1</sup>A. V. Moskvicheva, <sup>2</sup>A. A. Voytyuk, <sup>1</sup>V. I. Saleeva**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>2</sup>ООО "ОдинНаучСтройПроект", Volgograd, Russia

In this article, the authors highlight one of the important problems in the field of environmental protection, namely, the increase in the amount of waste in the form of waste water (WW) entering water bodies, most often without the required degree of purification. The main reason for the development of this problem is the rapid growth of industrial production. The authors of the article made a literary search for effective and economically justified methods of industrial wastewater treatment. The article presents the results of research proving the effectiveness of industrial wastewater treatment by sorption method using granulated composite sorbent (GCS), a method for obtaining which was developed by the staff of the Department "water Supply and sanitation" of VSTU. During laboratory experiments, the processes of adsorption of pollutants in static and dynamic conditions with the use of a new filter material were studied, the results of the experiments were reflected in the form of output absorption curves. The article presents the main provisions of the Langmuir theory, on the basis of which the authors made a mathematical analysis of the obtained experimental regularities in the implementation of the process of sorption post-treatment of industrial wastewater using GCS.

**Keywords:** waste water, granular composite sorbent, Langmuir equation.

Следствием развития современной науки и прогрессивных технологий, является рост промышленного производства, что в первую очередь приводит к увеличению количества отходов, сбрасываемых в окружающую среду в виде сточных вод (СВ). В качестве загрязнителей могут присутствовать как анионы солей, так и различные катионы тяжелых металлов.

На сегодняшний день существует множество способов очистки объектов промышленного назначения, однако наиболее эффективным и часто используемым является адсорбция [1–3]. К числу достоинств обозначенного метода необходимо отнести высокую эффективность очистки достигается в диапазоне 90–95 %, а так же возможность применения данной обработки некондиционных вод с перспективой создания замкнутых безоотходных производств, основанных на широком использовании внутритехнологических водооборотов [3–5]. Однако необходимо отметить, что на степень очистки в первую очередь влияет сорбционная способность фильтрующего материала, которая в свою очередь зависит от величины адсорбционной поверхности и её доступности, от физико-химической структуры вещества и его нахождения в водной (жидкой) среде [6–10]. В связи с этим в области водоснабжения и водоотведения проводятся большие работы по совершенствованию технологии производства с целью уменьшения количества и снижения степени вредности сточных вод и образующихся отходов производства. Одним из способов достижения обозначенной цели является разработка и внедрение эффективных сорбентов. Их применение возможно как для очистки питьевой воды, так и

промстоков, имеющих в своем составе многокомпонентные загрязнители.

Способ получения такого комбинированного гранулированного сорбционно-фильтрующего материала, получившим название ГКС был разработан сотрудниками кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ВолгГТУ [11–13].

Эффективность доочистки некондиционных вод методом адсорбции подтверждалась на основании проведенных лабораторных исследований в статических и динамических режимах на реальных СВ по определению конечного содержания загрязнителей, превышающих изначально ПДК [14] в фильтрате. В таблице 1 представлен основной состав и концентрация загрязняющих компонентов рассматриваемых некондиционных вод, предварительно подвергавшихся механической очистке, а затем электрохимической обработке.

Таблица 1  
**Концентрация компонентов – загрязнителей СВ табачной фабрики после электрохимической обработки для изучения сорбционной доочистки в статическом и динамическом режимах**

Загрязняющий компонент	Концентрация
БПК <sub>полн.</sub>	178–180 мг·О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
ХПК	204–210 мг·О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
АПАВ	0,9–1,2 мг/дм <sup>3</sup>
Активный хлор	940–1000 мг/дм <sup>3</sup>

Результаты лабораторных опытов приведены на рисунках 1–2 в виде выходных кривых поглощения на основании определения статической и динамической адсорбционных емкостей в зависимости от изменения значений концентраций компонентов-загрязнителей (табл. 1) в фильтрате из некондиционных вод предприятия табачной индустрии.

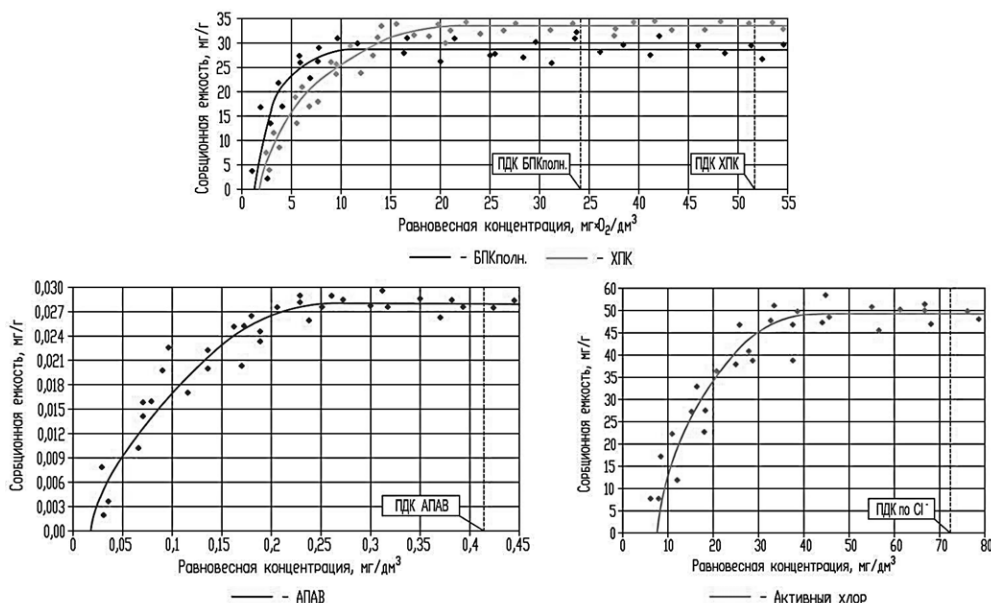


Рис. 1. Зависимость адсорбционной емкости от изменения концентраций компонентов-загрязнителей в фильтрате в статическом режиме

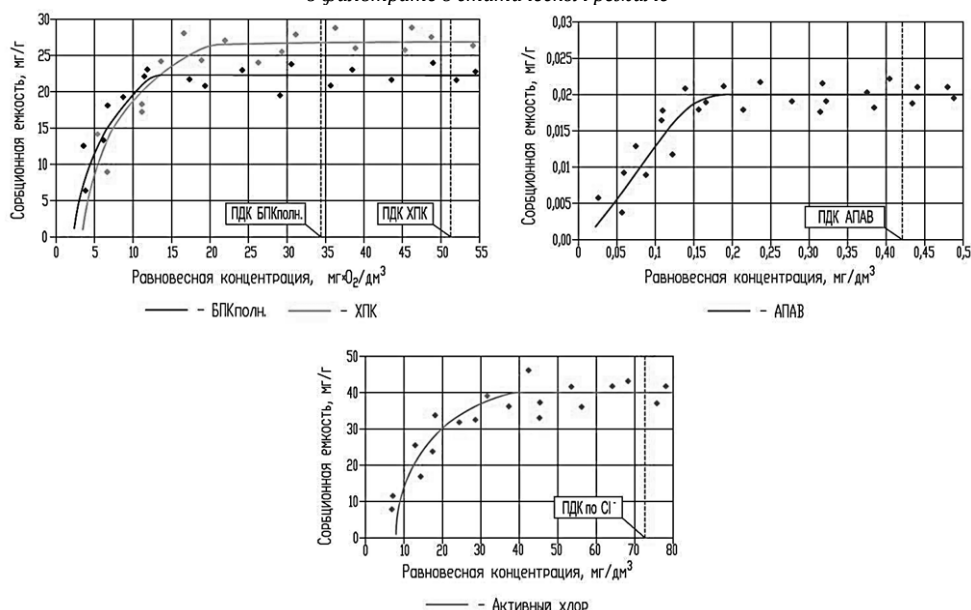


Рис. 2. Зависимость адсорбционной емкости от изменения концентраций компонентов-загрязнителей в фильтрате в динамическом режиме

Адсорбционные кривые, полученные в статическом и динамическом режимах (рис. 1-2) были отнесены к изотермам класса Ленгмюра (типа - L) [15, 16]. Теория, выдвигнутая Ленгмюром, позволяет описать основные процессы, происходящие на границе твёрдое тело - жидкость и твёрдое тело - газ. Согласно данному предположению, процесс адсорбции происходит на наиболее активных центрах, которые в свою очередь равноценны и имеют локализованный характер. В частности, это объясняется тем, что активный центр способен удерживать только одну молекулу, в результате чего наступает адсорбционное насыщение по мере заполнения данных центров. Через некоторое время происходит де-

сорбция, т. к. адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом. Следствием этого является установление динамического равновесия в системе [16, 17].

На основе представлений о мономолекулярном характере процесса адсорбции и молекулярно-кинетической теории выдвинутой Ленгмюром в отношении применения к растворам и жидким средам уравнение имеет вид (формула 1) [18, 19]:

$$a = \frac{a_m \cdot k \cdot p}{1 + k \cdot p}, \quad (1)$$

где  $a$  - величина адсорбции (сорбционная емкость);

$p$  - равновесная концентрация загрязнителей;

$a_m$  и  $k$  – константы, имеющие следующий физический смысл:  $a_m$  – величина адсорбции, соответствующая полному заполнению поверхности (емкость монослоя),  $k$  – константа, зависящая от температуры и энергии адсорбции.

Значения констант  $a_m$  и  $k$ , входящих в уравнение Ленгмюра, приведены в (табл. 2).

Таблица 2  
Значения констант  $a_m$  и  $k$ , входящих в уравнение Ленгмюра

Коэффициенты	Статический режим				Динамический режим			
	БПК <sub>полн.</sub>	ХПК	АПАВ	Активный хлор	БПК <sub>полн.</sub>	ХПК	АПАВ	Активный хлор
$a_m$	29	35	0,034	55	23,5	29	0,021	43
$k$	1,3	0,6	15	0,16	0,5	0,3	60	0,22

Анализ кривых при сравнении зависимости величины адсорбции от равновесной концентрации загрязнителей и теоретической зависимости, полученных опытным путем и описываемой математической формулой (1) представлены на рисунках 3–4.

Приведенные выше графики (рис. 3–4) позволяют сделать вывод, что характер поведения полученных экспериментальной и теоретической кривой зачастую не совпадает, несмотря на очевидную схожесть по внешнему виду.

Чтобы удостовериться и проверить предположение о возможности описания полученных лабораторных результатов согласно математическому выражению (1), было произведено его преобразование к линейному виду:

$$\frac{a}{p} = \frac{a_m \cdot k}{1 + k \cdot p},$$

$$\frac{p}{a} = \frac{1 + k \cdot p}{a_m \cdot k},$$

$$\frac{p}{a} = \frac{1}{a_m \cdot k} + \frac{1}{a_m} \cdot p. \quad (2)$$

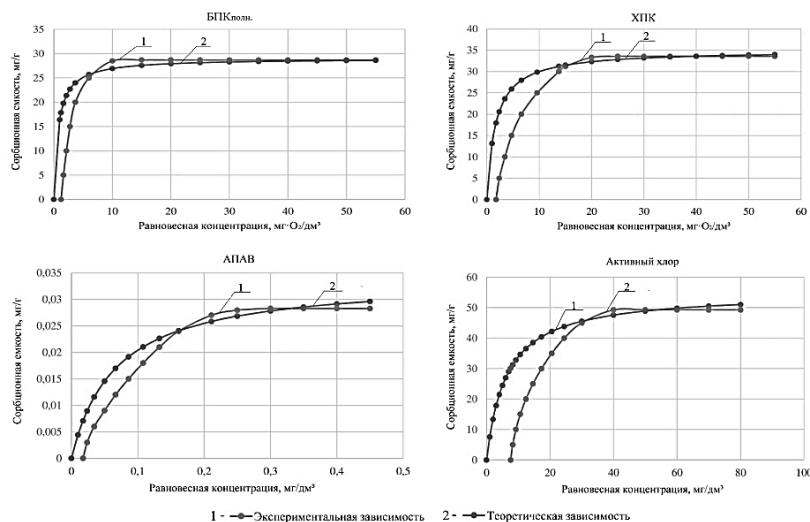


Рис. 3. Анализ сравнения экспериментальных и теоретических кривых зависимости величины адсорбции от равновесной концентрации компонентов-загрязнителей в статическом режиме

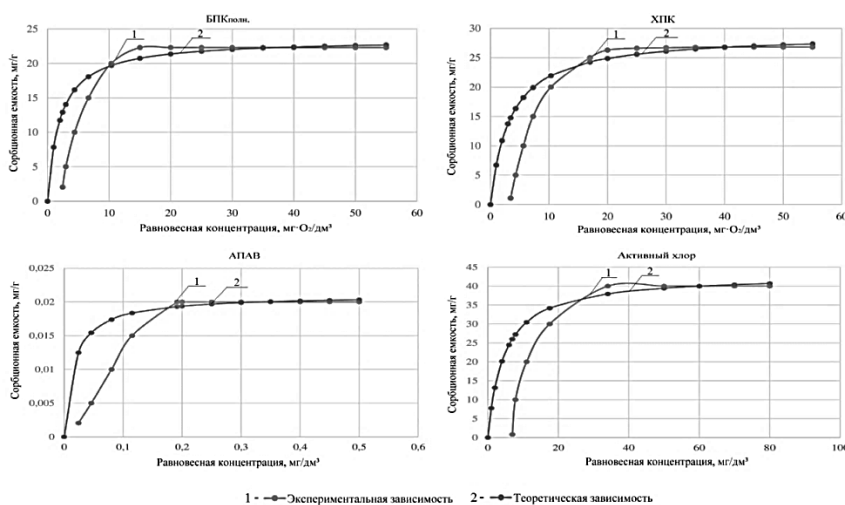


Рис. 4. Анализ сравнения экспериментальных и теоретических кривых зависимости величины адсорбции от равновесной концентрации компонентов-загрязнителей в динамическом режиме

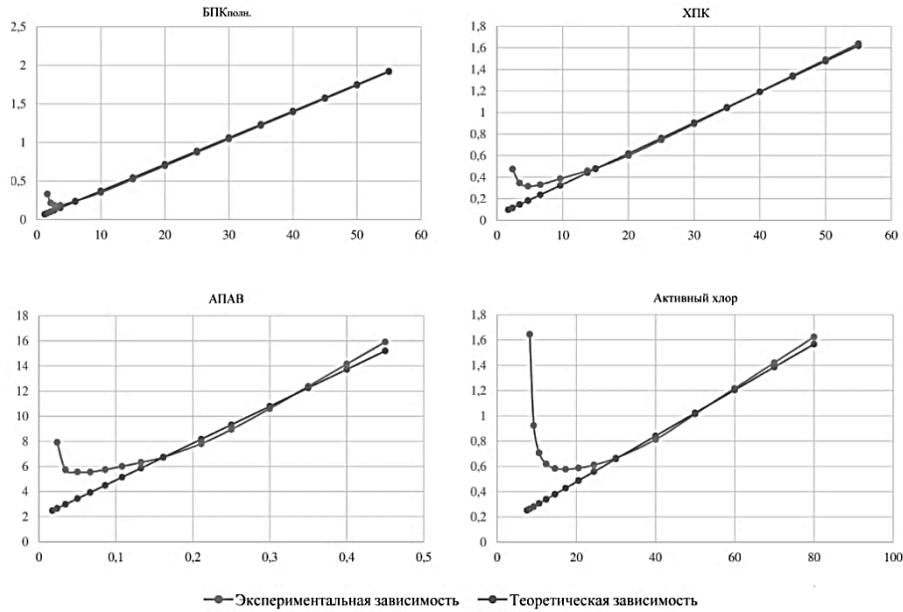


Рис. 5. Анализ сравнения экспериментальных и теоретических кривых зависимости величины адсорбции в статическом режиме от равновесной концентрации компонентов-загрязнителей, имеющих вид  $\frac{P}{a}(p)$

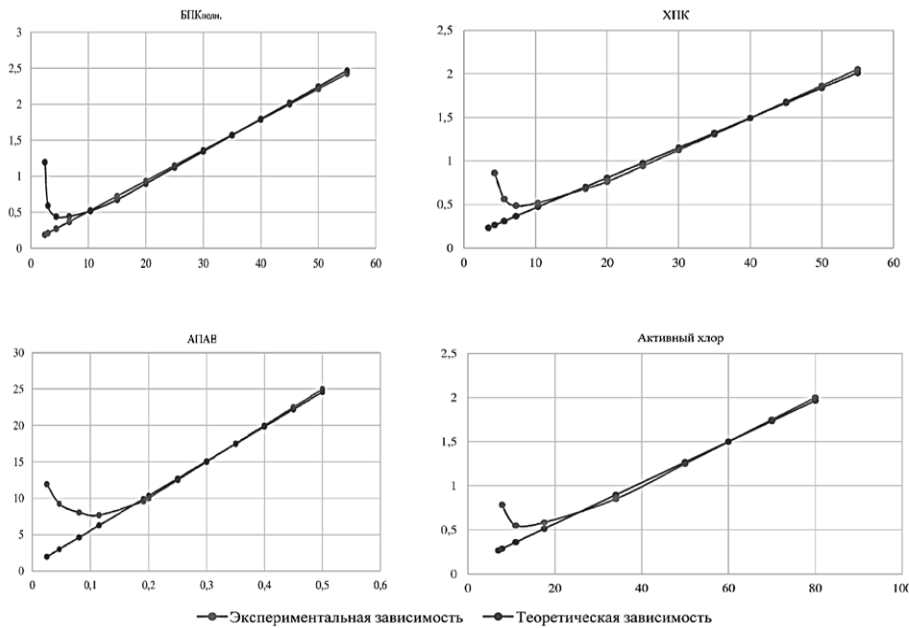


Рис. 6. Анализ сравнения экспериментальных и теоретических кривых зависимости величины адсорбции в динамическом режиме от равновесной концентрации компонентов-загрязнителей, имеющих вид  $\frac{P}{a}(p)$

Это может свидетельствовать о том, что в теории Ленгмюра приняты допущения об отсутствии взаимодействия адсорбированных молекул, а именно в том, что адсорбция вещества происходит не на всей поверхности, а только на активных центрах, причем, когда все активные центры заняты и поверхность адсорбента покрыта слоем толщиной в одну молекулу (мономолекулярный слой), наступает адсорбционное равновесие и дальнейшее увеличение адсорб-

ции невозможно. Объяснение описываемых выше различий по результатам проведенного анализа сравнения экспериментальных и теоретических кривых зависимости величины адсорбции в статическом и динамическом режимах от равновесной концентрации компонентов-загрязнителей, имеющих вид  $\frac{P}{a}(p)$  (рис. 5-6), могут указывать на то, что адсорбция какого-либо вещества осуществляется, только преиму-

щественно на активных центрах, а не на всей поверхности, при этом если поверхность адсорбента покрыта мономолекулярным слоем (слоем толщиной в одну молекулу) и все центры активности заняты, то дальнейшее увеличение адсорбции невозможно и наступает адсорбционное равновесие. Таким образом, можно сделать вывод, что в теории Ленгмюра приняты некоторые допущения, связанные с отсутствием описанного выше процесса распределения адсорбции вещества по его поверхности. Связано это в первую очередь с тем, что при изучении структуры поверхности большинства адсорбентов, отмечается ее неоднородность и очень ча-

сто на поверхности адсорбента при взаимодействии молекул адсорбата друг с другом, в процессе адсорбции не наблюдается образование мономолекулярного слоя.

Таким образом, по результатам математического описания, представленного в данной статье, удалось доказать возможность применимости теории описанной Ленгмюром на примере проведения сравнительного анализа экспериментальных и теоретических кривых зависимости адсорбционной емкости от концентраций компонентов-загрязнителей СВ с применением разработанного авторами ГКС в статическом и динамическом режимах.

#### Список литературы

1. Климов, Е. С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод / Е. С. Климов, М. В. Бузаева ; под общ. ред. Е. С. Климова. - Ульяновск : УЛГТУ, 2011. - 201 с.
2. Яковлев, С. В. Очистка производственных сточных вод: учеб. пособие / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин. - Москва : Стройиздат, 1985. - 216 с.
3. Zuckerman, M. M. Activated Carbon Adsorption of organic from Aqueous Phase / M. M. Zuckerman, A. H. Molof // Water Poll. Control fed. - 1970. - V. 42. - P. 43
4. Современные решения в вопросе разработки эффективных технологических схем очистки сточных вод на предприятиях пищевой промышленности (ППП) / Д.О. Игнаткина, Э.П. Доскина, Е.В. Федулова, В.А. Коробков // Технология очистки воды «ТЕХНОВОД-2019»: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 22-23 окт. 2019 г./ Южно-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. - Новочеркасск, 2019. - С. 291-297.
5. Современные системы оборотного водоснабжения промышленного предприятия / Е.В. Москвичева, А.Р. Салахутдинова, Д.О. Игнаткина, П.А. Сидякин, Д.В. Щитов, З.К. Ибрагимов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. - 2015. - Вып. 39 (58). - С. 151-163.
6. Адсорбционная технология очистки сточных вод / А. М. Когановский [и др.]. - Киев : Техника, 1981. - 175 с.
7. Ахмадеев, В. Я. Физико-химические методы и основные теоретические принципы адсорбционной очистки сточных вод от органических соединений / В. Я. Ахмадеев, Н. В. Савина. - Москва: ЦНИИ «Электроника», 1975. - 60 с.
8. Woolard, C. D. Evaluation of the use of modified coal ash as a potential sorbent for organic waste streams / C. D. Woolard, J. Strong, C. R. Erasmus // Applied Geochemistry. - 2002. - Vol. 17, № 8. - P. 1159-1164.
9. Якимова, Т. И. Исследование адсорбции растворенных веществ промышленными АУ / Т. И. Якимова, А. В. Мамченко, А. М. Когановский // Химия и технология воды. - 1978. - № 1. - С. 26.
10. Jisti, D. M. Activated Carbon Adsorption of Petrochemicals / D. M. Jisti, R. A. Conway // J. Water Poll. Control fed. - 1974. - V. 46. - P. 947.
11. Пат. 2644880 Российская Федерация, МПК МПК: B01J 20/24 (2006.01) Способ получения сорбента для очистки сточных вод от многокомпонентных загрязнений / Д. О. Игнаткина [и др.]; ВолгГТУ. - № 2017108520 ; заявл. 14.03.2017; опубл. 14.02.2018, Бюл. № 5. - 10 с.
12. Технология получения гранулированного сорбционно - фильтрующего композитного материала на основе отхода производства (на примере предприятия табачной индустрии РФ) / Д. О. Игнаткина [и др.] // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2017. - Вып. 49 (68) - С. 110-121.
13. Игнаткина, Д.О. Composite Sorbent Filter Material on the Basis of Man-Caused and Minerals / Д.О. Игнаткина, Е.В. Москвичева, А.А. Войтюк // Materials Science Forum. - 2019. - Vol. 945. - P. 983-987. - URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945>.
14. Постановление Администрации Волгограда от 18 июня 2015 г. № 840"Об утверждении нормативов водоотведения (сброса) по составу и свойствам сточных вод, отводимых в окружающую природную среду через централизованные системы водоотведения Волгограда". - Режим доступа: <http://www.garant.ru/hotlaw/volga/633238/>.
15. Букалов, Г. Э. Исследование возможности очистки многокомпонентных сточных вод сорбцией на углеродном сорбенте / Г. Э. Букалов // Теория. Практика. Инновации. - 2017. - № 6(18). - С. 192 -197.
16. Математическая модель определения извлекаемой в процессе сорбционной очистки загрязняющих веществ // С. Ю. Андреева [и др.] // Региональная архитектура и строительство. - 2017. - № 1(30). - С. 118-123.
17. Игнаткина Д.О. Разработка технологии очистки многокомпонентных сточных вод предприятия табачной промышленности: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.04 / Игнаткина Дарья Олеговна; Пенза, 2019. - 24 с
18. Математическое описание экспериментальных закономерностей процесса сорбционной доочистки сточных вод на примере предприятия табачной индустрии РФ / Д.О. Игнаткина, А.П. Поздняков, А.В. Москвичева, Е.В. Москвичева, А.А. Войтюк // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. - 2019. - № 4 (77). - С. 110-121.
19. Adsorption: progress in fundamental and application research: selected reports at the 4th pacific basic conference on absorption science and technology // World scientific Publishing company incorporated, 2007. - 281 p.

© Д. О. Игнаткина, А. В. Москвичева, А. А. Войтюк, В. И. Салеева

#### Ссылка для цитирования:

Д. О. Игнаткина, А. В. Москвичева, А. А. Войтюк, В. И. Салеева. Математический анализ экспериментальных закономерностей процесса сорбционной доочистки сточных вод с использованием гранулированного композитного сорбента // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 3 (33). С. 47-52.