

Естественные науки. 2023. № 2 (11). С. 23–30.
Yestestvennye nauki = Natural Sciences. 2023; 2 (11): 23–30 (In Russ.)

Научная статья
УДК 544.723.212
doi 10.54398/1818507X_2023_2_23

**АДСОРБЦИОННЫЕ МОДЕЛИ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАВНОВЕСИЯ
В СИСТЕМЕ «НПАВ — РАСТИТЕЛЬНЫЙ СОРБЕНТ»**

***Шакирова Виктория Викторовна*^{1✉}, *Садомцева Ольга Сергеевна*²,
Кудрякова Лия Ринатовна^{3©}**

^{1, 2, 3}Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева,
г. Астрахань, Россия

¹svv_2004@mail.ru ✉

Аннотация. Представлены результаты исследования процессов адсорбции неионогенных поверхностно-активных веществ (на примере ОП-10) на сорбенте растительного происхождения, представляющего собой продукты переработки томатов — томатный жмых. Для описания экспериментальных изотерм адсорбции были использованы модели адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина. Рассчитаны параметры интенсивности и эффективности сорбционного процесса. Проведён сравнительный анализ полученных констант, соответствующих этим моделям, и определена наиболее предпочтительная модель с учётом коэффициента детерминации. Установлено, что модель Ленгмюра наиболее предпочтительна для адсорбции в системе «ОП-10 – растительный сорбент», что позволяет уверенно предположить, что поверхность рассматриваемых природных материалов содержит большое количество активных центров.

Ключевые слова: неионогенные поверхностно-активные вещества, сорбция, сорбент, адсорбционное равновесие, модели сорбции, термодинамические параметры

Для цитирования: Шакирова В. В., Садомцева О. С., Кудрякова Л. Р. Адсорбционные модели для описания равновесия в системе «НПАВ — растительный сорбент» // Естественные науки. 2023. № 2 (11). С. 23–30. https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_2_23.

**ADSORPTION MODELS FOR DESCRIBING
THE EQUILIBRIUM IN THE “NPAV — PLANT SORBENT SYSTEM”**

***Shakirova Victoria V.*^{1✉}, *Sadomtseva Olga S.*², *Kudryakova Liya R.*³**

^{1, 2, 3}Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

¹svv_2004@mail.ru ✉

Abstract. The results of the study of the processes of adsorption of nonionic surfactants (on the example of OP-10) on a sorbent of plant origin, which is the products of tomato processing — tomato cake, are presented. Langmuir, Freundlich and Temkin adsorption models were used to describe experimental adsorption isotherms. The parameters of the intensity and

efficiency of the sorption process are calculated. A comparative analysis of the obtained constants corresponding to these models was carried out, and the most preferred model was determined taking into account the coefficient of determination. It is established that the Langmuir model is the most preferable for adsorption in the OP-10 — plant sorbent system, which allows us to confidently assume that the surface of the natural materials under consideration contains a large number of active centers.

Keywords: nonionic surfactants, sorption, sorbent, adsorption equilibrium, sorption models, thermodynamic parameters

For citation: Shakirova V. V., Sadomtseva O. S., Kudryakova L. R. Adsorption models for describing the equilibrium in the system of nonionic surfactants — plant sorbent. *Yestestvennye nauki = Natural Sciences*. 2023; 2 (11): 23–30. https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_2_23.

Нефть является основным сырьём при производстве пластмасс, резины, растворителей, моющих средств, удобрений, топлива. Поскольку пластиковые воды содержат большое количество хлоридов щелочноземельных металлов (главным образом, кальция, магния), при использовании их для заводнения рекомендуется применять неионогенные поверхностно-активные вещества (НПАВ), которые, в отличие от анионоактивных ПАВ, не вступают в химическое взаимодействие с солями щелочноземельных металлов, обладают достаточно высокой поверхностной активностью и меньшей адсорбируемостью на поверхности пород.

В качестве неионогенных ПАВ в промышленности из отечественных продуктов используются чаще всего сульфанол, ОП-7, ОП-10 и их зарубежные аналоги: «Превоцел W-ON», «Тритон X-100», «Игепал СО-630», «Тержитол NP-27» и др.

Настоящая работа посвящена сравнительному исследованию применимости адсорбционных моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина для описания экспериментальных изотерм адсорбции ОП-10 на сорбенте растительного происхождения, представляющего собой продукты переработки томатов — томатный жмых.

Экспериментальное исследование проводили на модельных растворах поверхностно-активного вещества с известной концентрацией. Томатный жмых предварительно промывали водой и просушивали на открытом воздухе.

Для построения градуировочного графика готовили серию растворов с заданной концентрацией ОП-10 в диапазоне 0,1–11,1 г/дм³. По полученным в ходе эксперимента данным строили градуировочный график в координатах «относительная вязкость — концентрация» (рис. 1), предварительно обработав результаты опытов по методу наименьших квадратов.

По результатам всех расчётов было найдено уравнение прямой зависимости относительной вязкости от концентрации:

$$y = 0,0123x + 1,0143.$$

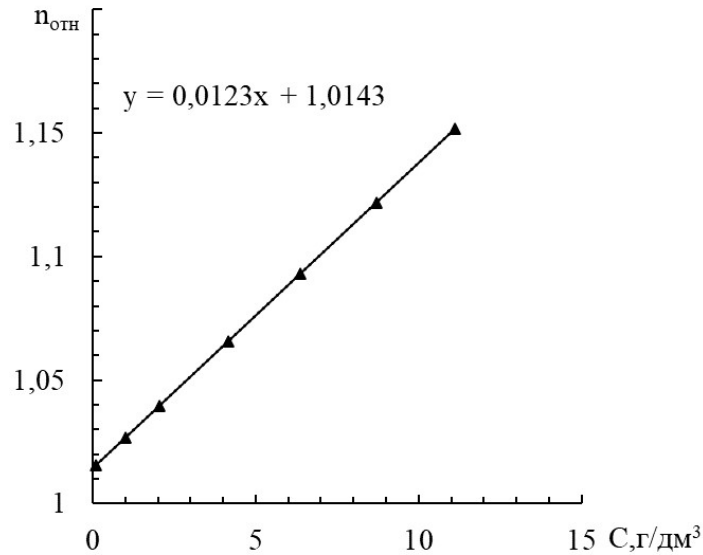


Рисунок 1 — Градуировочный график в координатах «относительная вязкость – концентрация»

В дальнейшем уравнение прямой было использовано для нахождения содержания остаточного количества ОП-10 в растворе после окончания процесса сорбции. Используя полученные данные, рассчитывают величину адсорбции Q (в г/г) по формуле:

$$Q = \frac{(C_0 - C) \cdot V}{m},$$

где C_0 — начальная концентрация ОП-10 в растворе до сорбции, г/дм³;

$C(C\tau)$ — концентрация ОП-10 в растворе в момент времени после адсорбции, г/ дм³;

V — объём раствора в дм³;

m — масса навески растительного сорбента, г.

По результатам расчёта строят графики зависимости величины адсорбции Q от концентрации ОП-10 после сорбции при трёх температурах, представленные на рисунке 2.

Далее, для более полной оценки адсорбционных свойств сорбента по отношению к ОП-10 изотермы адсорбции были проанализированы в соответствующих координатах линеаризации классических уравнений адсорбции Ленгмюра, Темкина и Фрейндлиха (см. рис. 3–5).

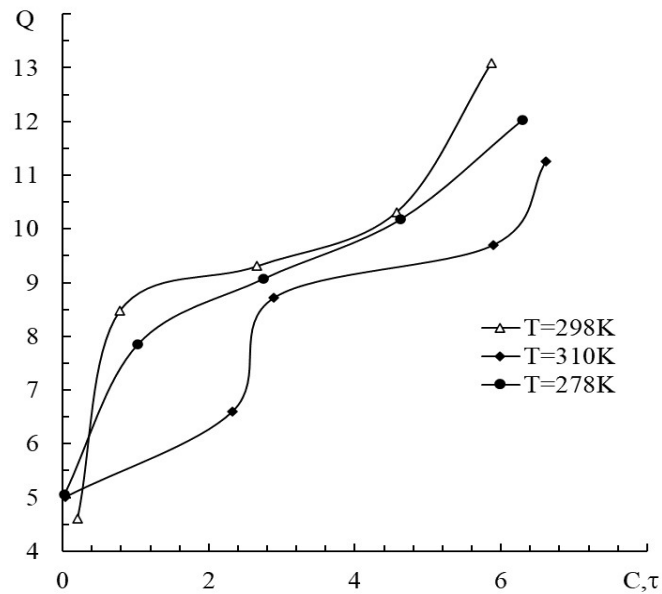


Рисунок 2 — Зависимость величины адсорбции от концентрации ОП-10

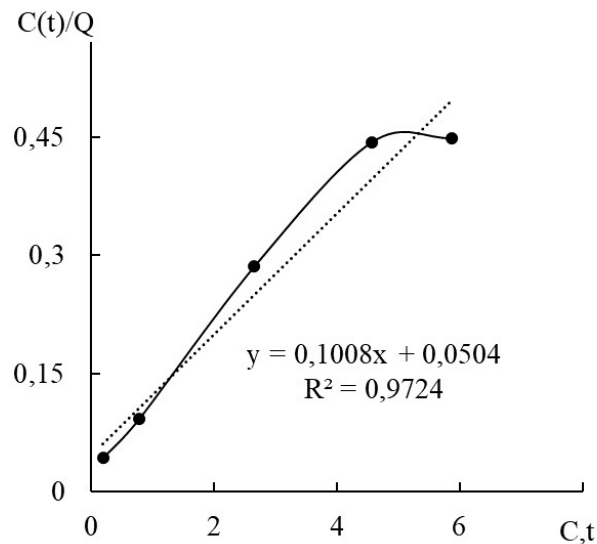


Рисунок 3 — Изотермы адсорбции ОП-10 по модели Ленгмюра

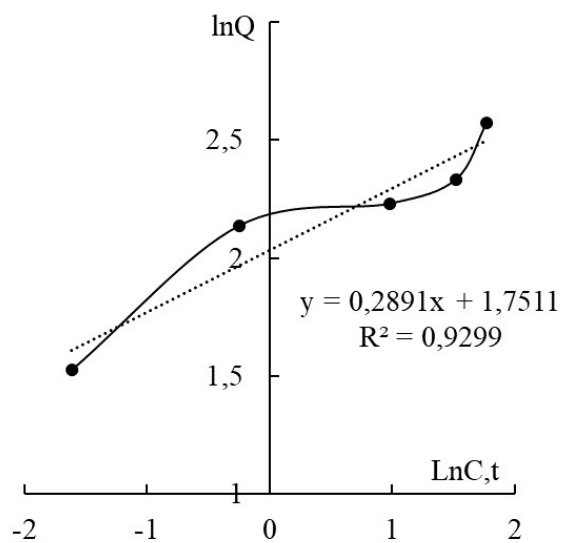


Рисунок 4 — Изотермы адсорбции ОП-10 по модели Фрейндлиха

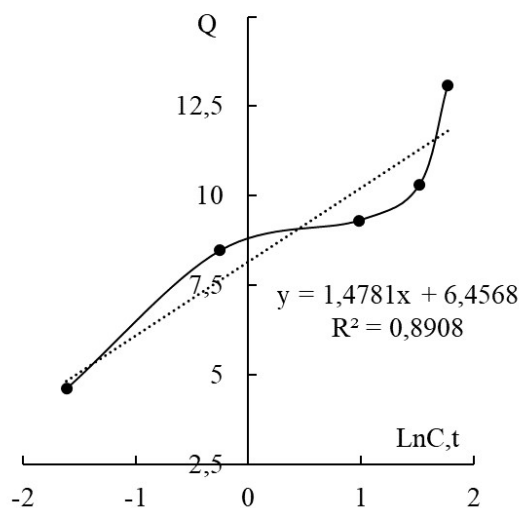


Рисунок 5 — Изотермы адсорбции ОП-10 по модели Темкина

Параметры интенсивности и эффективности процесса адсорбции ОП-10 на сорбенте растительного происхождения, найденные графическим способом в рамках данных моделей, представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры интенсивности и эффективности процесса адсорбции ОП-10 на томатном жмыхе

Вид изотермы	Параметры изотермы		R ²	Формула
	Интенсивность	Эффективность		
Фрейндлих	$n = 3,459$	$K_F = 5,761$	0,929	$y = 0,289x + 1,751$
Ленгмюр	$K_L = 19,6838$ г/ммоль	$Q_e = 9,921$ ммоль/г	0,972	$y = 0,101x + 0,504$
Темкин	$K_T = 78,910$	$\infty = 0,676$	0,891	$y = 1,478x + 6,457$

Путём сопоставления коэффициентов детерминации можно предположить, что модель Ленгмюра лучше других описывает экспериментальные данные по адсорбции ОП-10 томатным жмыхом. Это указывает на то, что адсорбция ОП-10 происходит на активных центрах адсорбента, которые энергетически эквивалентны, и что между адсорбированными молекулами отсутствует взаимодействие.

Далее были построены изотермы адсорбции ОП-10 (рис. 6, 7) и рассчитаны параметры интенсивности и эффективности процесса сорбции для разных температур, по модели Ленгмюра, которая более предпочтительна для описания процесса.

Исходя из данных, полученных при разных температурах, можем утверждать, что адсорбция ОП-10 идёт лучше при температуре 298 К. Характер зависимости процесса адсорбции от температуры неоднозначный.

Изменение температуры процесса сорбции ведёт к изменению термодинамических параметров, которые были рассчитаны по полученным экспериментальным данным (табл. 3).

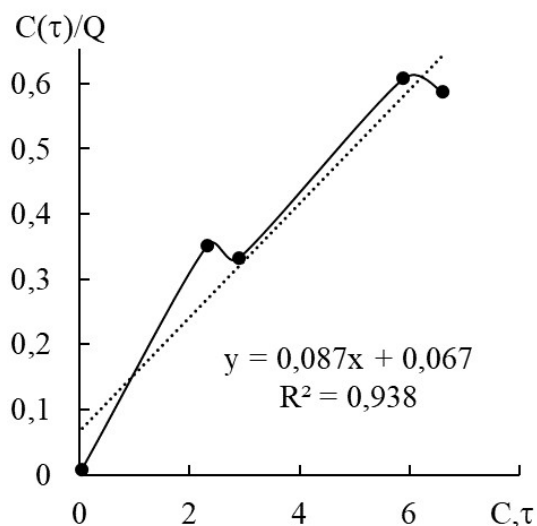


Рисунок 6 — Изотерма адсорбции ОП-10 по модели Ленгмюра при температуре 310 К

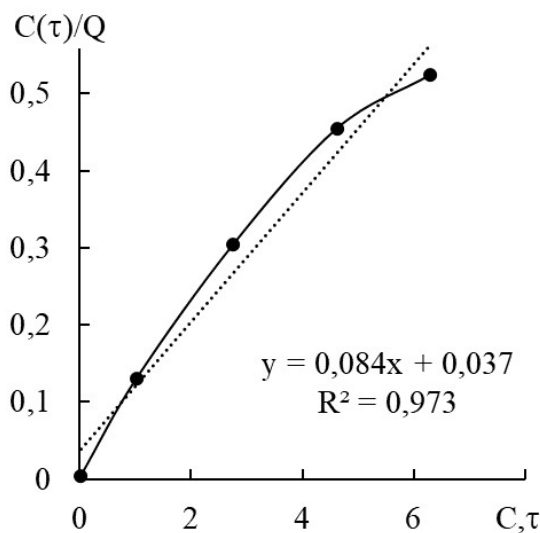


Рисунок 7 — Изотерма адсорбции ОП-10 по модели Ленгмюра при температуре 278 К

Таблица 2 — Параметры интенсивности и эффективности процесса адсорбции ОП-10 на томатном жмыхе по модели Ленгмюра

Вид изотермы	Параметры изотермы		R ²
	Интенсивность K_L , г/ммоль	Эффективность Q_e , ммоль/г	
278	7,014	0,846	0,933
298	19,684	9,921	0,972
310	9,970	10,030	0,938

Анализируя полученные результаты, можем предположить, что сорбция ОП-10 томатным жмыхом является физической, реакция — эндотермической, поскольку энтальпия реакции меньше 20 кДж/моль и имеет положительное значение; отрицательные значения свободной энергии Гиббса указывает на то, что реакция протекает самопроизвольно.

Таблица 3 — Термодинамические параметры процесса адсорбции ОП-10 на томатном жмыхе

Т, К	К	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/моль, К	ΔG , кДж/моль
278	7,01	7,87	44,56	4,51
298	19,68		51,24	-7,38
310	9,97		44,69	-5,93

В заключение хотелось бы сказать, что сорбционная способность томатного жмыха по отношению к ОП-10 позволяет использовать его в качестве сорбентов для очистки воды. Результаты, полученные в ходе исследования, могут стать физико-химическим базисом для разработки методов очистки сточных вод с использованием природных материалов Астраханского региона.

Список литературы

1. Largitte, L. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon / L. Largitte, R. Pasquier // *Chemical engineering research and design*. — 2016. — Vol. 109. — P. 495–504.
2. Zelentsov, V. I. Fluorine adsorption by aluminum oxihydrates subjected to thermal treatment / V. I. Zelentsov, T. Ya. Datsko, E. E. Dvornikova // *Surface engineering and applied electrochemistry*. — 2008. — Vol. 44 (1). — P. 64–68.
3. Inyinbor, A. A. Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of rhodamine B dye onto raphia hookerie fruit epicarp / A. A. Inyinbor, F. A. Adekola, G. A. Olatunji // *Water Resources and Industry*. — 2016. — Vol. 15. — P. 14–27.
4. María Dolores Carro Travieso. Chapter two — Tomato by-products as animal feed / María Dolores Carro Travieso, Trinidad de Evan, Carlos Navarro Marcos, Eduarda Molina-Alcaide // *Tomato Processing by-Products* / eds: Mejdi Jeguirim, Antonis Zorpas. — Academic Press, 2022. — P. 33–76.
5. Hamed M. El Mashad. Chapter 5 — Tomato / Hamed M. El Mashad, Liming Zhao, Ruihong Zhang, Zhongli Pan // *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* / eds: Zhongli Pan, Ruihong Zhang, Steven Zicari. — Academic Press, 2019. P. 107–131.
6. Shakirova, V. V. Effect of adsorption processes on oil-containing water purification by flocculation method / V. V. Shakirova, L. A. Dzhigola, O. S. Sadomtseva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — Smolensk, 2021. — P. 052031. — doi 10.1088/1755-1315/723/5/052031. — EDN DMYAJR.
7. Исследование процессов сорбции фенолов на различных сорбентах / В. В. Шакирова, О. С. Садомцева, В. В. Елина [и др.] // *Экологические системы и приборы*. — 2014. — № 1. — С. 43–48. — EDN SIMRYF.

References

1. Largitte L., Pasquier R. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical engineering research and design*. 2016; 109: 495–504.
2. Zelentsov V. I., Datsko T. Ya., Dvornikova E. E. Fluorine adsorption by aluminum oxihydrates subjected to thermal treatment. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2008; 44 (1): 64–68.

3. Inyinbor A. A., Adekola F. A., Olatunji G. A. Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of rhodamine B dye onto raphia hookerie fruit epicarp. *Water Resources and Industry*. 2016; 15: 14–27.

4. María Dolores Carro Travieso, Trinidad de Evan, Carlos Navarro Marcos, Eduarda Molina-Alcaide. Chapter two — Tomato by-products as animal feed. *Tomato Processing by-Products*. Ed. by Mejdi Jeguirim, Antonis Zorpas. Academic Press; 2022: 33–76.

5. Hamed M. El Mashad, Liming Zhao, Ruihong Zhang, Zhongli Pan. Chapter 5 — Tomato. *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. Ed. by Zhongli Pan, Ruihong Zhang, Steven Zicari. Academic Press; 2019: 107–131.

6. Shakirova, V. V., Dzhigola, L. A., Sadomtseva, O. S. Effect of adsorption processes on oil-containing water purification by flocculation method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Smolensk; 2021: 052031. doi 10.1088/1755-1315/723/5/052031. EDN DMYAJR.

7. Shakirova, V. V., Sadomtseva, O. S., Elina, V. V. et al. Issledovanie protsessov sorbtsii fenolov na razlichnykh sorbentakh. *Ecologicheskie sistemy i pribory = Ecological systems and devices*. 2014; 1: 43–48. EDN SIMRYF.

Информация об авторах

Шакирова В. В. — кандидат химических наук, доцент;
Садомцева О. С. — кандидат химических наук, доцент;
Кудрякова Л. Р. — студент.

Information about the authors

Shakirova V. V. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor;
Sadomtseva O. S. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor;
Kudryakova L. R. — student.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

All authors have made equivalent contributions to publications.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.06.2023; одобрена после рецензирования 30.06.2023; принята к публикации 04.07.2023.

The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 30.06.2023; accepted for publication 04.07.2023.