

#### 4. Современные инновации и технологии

УДК 628.3

### КИНЕТИКА СОРБЦИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА (III) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НАТИВНОЙ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИСТВОЙ ТОПОЛЯ

Р.З. Галимова<sup>1</sup>, Л.Ф. Латыпова<sup>2</sup>, И.Г. Шайхиев<sup>3</sup>, С.В. Свергузова<sup>4</sup>, Ю.С. Воронина<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет;  
420015, Россия, Казань; ул. к. Маркса, 68; e-mail: gumiuska666@mail.ru e-mail: ildars@inbox.ru  
<sup>4,5</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова;  
308012, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46; e-mail: pe@intbel.ru e-mail: yuliavoronina@mail.ru

**Аннотация.** Получен модифицированный сорбционный материал на основе листового опада тополя, путем обработки поверхности 3%-ным раствором серной кислоты. Изучены сорбционные свойства нативного и модифицированного листового опада по отношению к ионам железа (III) в статических условиях при температуре 20 °С. Максимальная сорбционная ёмкость нативного и модифицированного листового опада по отношению к ионам Fe<sup>3+</sup> составляет 7.0 мг/г и 22.7 мг/г соответственно. Полученные изотермы адсорбции соответствуют изотермам I-типа по классификации ИЮПАК или L-типа по классификации Гильса и описывают монослойную адсорбцию ионов железа (III) на сорбционном материале. Результаты обработки изотерм адсорбции в рамках четырех наиболее распространенных мономолекулярных моделей: Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина, а также ИК-спектры и элементный состав нативных и модифицированных листьев тополя свидетельствуют об образовании активных центров с большей сорбционной ёмкостью по отношению к ионам железа (III) по сравнению с другими участками поверхности сорбента. Используя константы уравнений Ленгмюра и Дубинина-Радушкевича исследуемых процессов, рассчитаны значения энергий сорбции и энергий Гиббса процесса, которые соответствуют самопроизвольному протеканию физической адсорбции как в случае нативного, так и для модифицированного материала. Исследована кинетика адсорбция ионов Fe<sup>3+</sup> нативными и модифицированными в слабоконцентрированных (3 %) растворах H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> листьями тополя. Обработкой кинетических зависимостей процессов сорбции в рамках диффузионной модели Бойда, установлено, что лимитирующей стадией процесса является смешанная диффузия, то есть в общий вклад процесса сорбции вносит свою роль как внешняя, так и внутренняя диффузия.

**Ключевые слова:** ионы Fe<sup>3+</sup>, листва тополя, растворы H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, обработка, адсорбция

#### ВВЕДЕНИЕ

Получение высокоэффективных, дешевых и доступных сорбционных материалов для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов является актуальной задачей современности [1-3]. В связи с этим, среди отечественного и зарубежного научного сообщества с каждым годом всё больше возрастает интерес к сорбционным свойствам нативных и модифицированных целлюлозосодержащих растительных материалов и влияния способа модификации на их сорбционные свойства по отношению к ионам тяжелых металлов [4-8].

Одним из наиболее распространенных ионов тяжелых металлов, попадающих в водные среды, являются ионы Fe(III). Значительные количества соединений железа поступают в природные водоемы, а затем и в системы водообеспечения населенных пунктов и городов с недостаточно очищенными сточными водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, химической и др. отраслей промышленности. Также в системах водоснабжения городах концентрации ионов железа могут быть весьма значительными из-за ржавления металлических труб в системах подачи питьевой воды.

Соединения железа в организме человека принимают участие в механизме кровообращения, влияет на состояние кожи, улучшают работу эндокринной системы, влияет на процесс роста детей и иммунитет. Недостаток этого элемента негативно сказывается на состоянии организма и может вызвать определенные заболевания. В тоже время, переизбыток этого элемента также пагубно влияет на здоровье населения. Для РФ предельным количеством является значение 0,3 мг/дм<sup>3</sup>. По данным Министерства здравоохранения РФ, в натуральных подземных колодцах центральных областей России насыщенность железом составляет от 0,45 мг/дм<sup>3</sup> до 21 мг/дм<sup>3</sup>.

В настоящее время получены и изучены свойства более сотни материалов для очистки сточных вод от ионов Fe(III) на основе листьев, опилок, коры, отходов от переработки сельскохозяйственной продукции и др. компонентов растительного происхождения [9-19]. Особый интерес представляет биомасса листвы деревьев. Достоинствами данного сорбционного материала являются ежегодно возобновляемая биомасса, дешевизна, доступность и эффективность по отношению к различным загрязняющим воду веществам, в том числе и ионам тяжелых металлов.

Также положительным аспектом названного сорбционного материала является ежегодный опад листвы, что облегчает сбор и использование последних. Ранее была показана возможность извлечения ионов Fe(II) и Fe(III) из водных растворов листвой некоторых пород деревьев, произрастающих в средней полосе России [20-23]. Выявлено, что наибольшей сорбционной емкостью по ионам Fe<sup>3+</sup> обладают листья тополя (*Populus alba*) [24].

Для увеличения адсорбционных показателей растительных сорбционных материалов, на практике применяют модификацию последних слабыми растворами кислот и/или щелочей [25]. Данный метод обработки является экономически выгодным и позволяет создать реагенты с высоким показателем селективного извлечения ионов металлов из водных сред.

## ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Первоначально получался модифицированный лиственный опад тополя путём приливания 200 см<sup>3</sup> 3 %-ого раствора серной кислоты в плоскодонные колбы, объемом 250 см<sup>3</sup>, с 15 г измельченного опада тополя. Содержимое колбы интенсивно перемешивалось при помощи шейкера в течение 3 часов. По истечении указанного промежутка времени, содержимое колбы отфильтровывалось, промывалось дистиллированной водой до достижения нейтральной среды. Далее, сорбционный материал высушивался в сушильном шкафу при температуре 105 °С до достижения постоянной массы.

Сорбционные свойства нативного и модифицированного листового опада тополя по отношению к ионам Fe<sup>3+</sup> определялись в статических условиях при дозировке сорбционного материала 1 г/дм<sup>3</sup> и температуре 20 °С. Для этого в конические колбы на 250 мл помещались навески сорбционного материала массой 0.1 г, приливались по 100 см<sup>3</sup> модельных растворов FeCl<sub>3</sub>·7H<sub>2</sub>O, с концентрациями ионов Fe<sup>3+</sup> 5; 10; 30; 50; 100; 250; 500; 1000; 1500 мг/дм<sup>3</sup>, плотно закрывались пробками и перемешивались на шейкере в течении 3 часов. По истечении заданного времени сорбент отфильтровывался и в фильтрах определялись остаточные концентрации ионов железа (III) фотометрическим методом при длине волны λ = 500 нм. Количество ионов Fe<sup>3+</sup>, сорбированных 1 г сорбента (А) в мг/г, рассчитывалось по формуле 1:

$$A = ((C_s - C_e) \cdot 100) / (1 \cdot 1000) \quad (1)$$

где  $C_s$  – исходная концентрация ионов металла, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_e$  – конечная концентрация ионов металла, мг/дм<sup>3</sup>; 100 – объем раствора, см<sup>3</sup>; 1 – вес сорбента, г; 1000 – переход от см<sup>3</sup> к дм<sup>3</sup>.

По полученным значениям сорбционной емкости (А) исследуемых материалов при различных равновесных концентрациях ионов железа (III) в растворе строились изотермы адсорбции ионов Fe<sup>3+</sup> нативным и модифицированным листовым опадом тополя.

Аналогичным образом строились кинетические зависимости процессов сорбции ионов Fe<sup>3+</sup> исходным и модифицированным листовым опадом тополя при температуре 20 °С, дозировке сорбционного материала 1 г/дм<sup>3</sup>, исходной концентрацией ионов железа (III) 100 мг/дм<sup>3</sup> и времени сорбции: 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 и 150 мин. По полученным значениям сорбционной емкости (А) исследуемых материалов при различном времени процессов сорбции строились кинетические зависимости адсорбции.

Анализ влияния кислотообработки на состав и структуру сорбционного материала (листового опада тополя до и после обработки 3% раствором серной кислоты) проводился с помощью ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрофотометре и элементного анализа на элементном анализаторе марки «Vario EL» путем их сжигания и последующего разделения газов – продуктов сгорания на адсорбционных колонках.

Изотермы адсорбции ионов железа (III) нативным и модифицированным листовым опадом тополя (рисунок 1) относятся к изотермам L-типа по классификации Гильса или I типа (Ленгмюровский тип) по классификации ИЮПАК и описывают протекание мономолекулярной адсорбции ионов на поверхности сорбционного материала [26]. Максимальная сорбционная ёмкость нативного листового опада по отношению к ионам Fe<sup>3+</sup> составляет 7,0 мг/г (0,11 ммоль/г), модифицированного листового опада – 22,7 мг/г (0,36 ммоль/г).

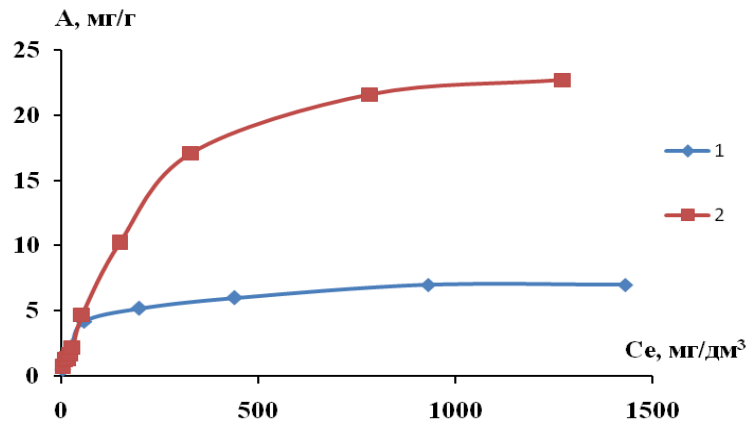


Рис. 1. Изотермы сорбции ионов  $Fe^{3+}$ :  
1 – исходным и 2 – модифицированным листовым опадом тополя

Причиной увеличения сорбционной емкости модифицированных образцов является процесс деструкции – снижение степени полимеризации глюкозы, вследствие разрыва гликозидных связей при действии реагентов. Также при кислотной обработке происходит вымывание низкомолекулярных фрагментов и белков с образованием неоднородной поверхности [27]. Образование неоднородной поверхности сорбционного материала в результате его обработки разбавленным раствором серной кислоты также подтверждается результатами ИК-спектроскопии и элементного анализа нативных и модифицированных листьев тополя (рисунок 2 и таблица 1).

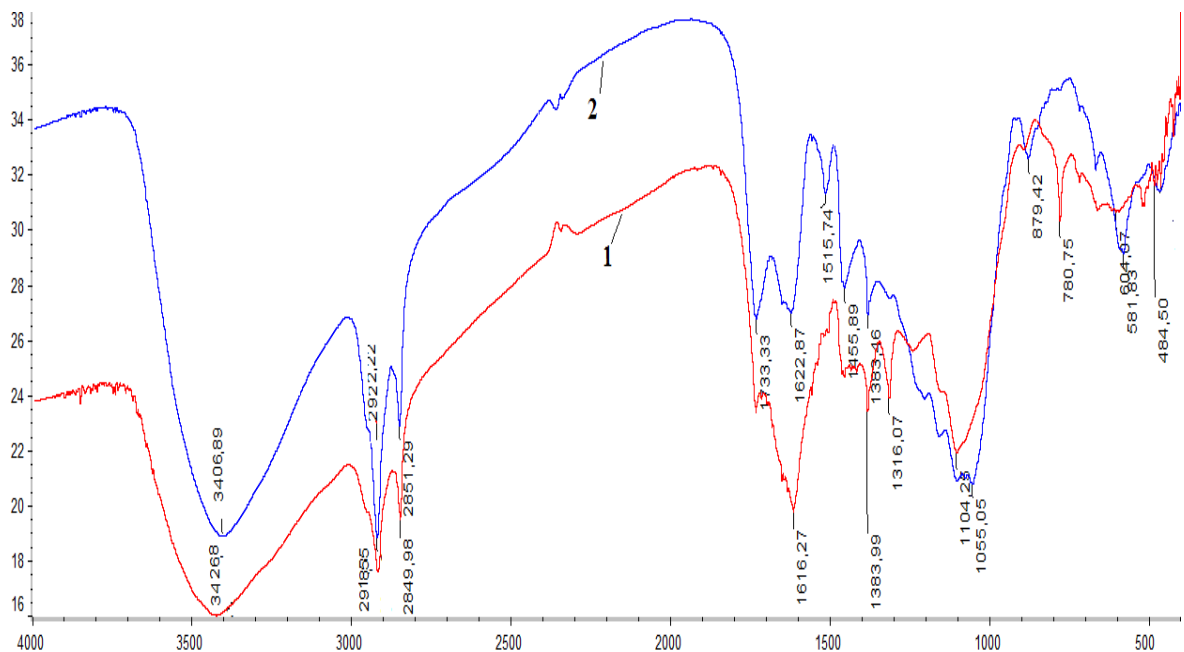


Рис. 2. ИК-спектры листового опада тополя:  
1 – исходный образец; 2 – образец, модифицированный 3%-ным раствором  $H_2SO_4$

Анализируя ИК-спектры исходного образца листового опада тополя и образца, обработанного 3 %-ным раствором  $H_2SO_4$  можно отметить появление новых полос поглощения в области  $151,74\text{ см}^{-1}$  и  $1455,89\text{ см}^{-1}$ , относящиеся к колебаниям бензольного кольца в лигнине. Данные полосы характеризуют взаимодействие лигнина с серной кислотой, с образованием растворимой соли. Незначительные изменения спектра отмечаются в области  $500-900\text{ см}^{-1}$ , что может свидетельствовать об образовании новых связей между молекулами целлюлозы и воды, вследствие раскручивания целлюлозных волокон, а также разрушении водородных связей. Данное утверждение подтверждается результатами элементного анализа (табл. 1).

Таблица 1.  
Элементный состав листового опада тополя

| Вид листового опада  | Процентное содержание элементов в листовом опаде |       |      |
|--|--|-------|------|
|  | N  | C     | H    |
| Листовой опад тополя   | 3,23   | 42,19 | 7,09 |
| Листовой опад тополя, модифицированный 3%-ным раствором H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 3,13   | 44,45 | 5,80 |

Анализируя полученные результаты можно отметить, что содержание азота (N) и водорода (H) снижается после обработки листвы тополя слабым раствором кислоты. Содержание углерода (C) для сорбционного материала, модифицированного слабым раствором серной кислоты, незначительно увеличивается, по сравнению с исходным образцом. Очевидно, что модификация приводит к разрушению межмолекулярных связей сорбционного материала, а также способствует образованию новых связей между молекулами целлюлозы и воды.

Образование неоднородной поверхности (активных центров) с большей сорбционной ёмкостью по сравнению с другими участками поверхности сорбента, то есть переход механизма процесса сорбции на однородной поверхности (модель Ленгмюра), для нативного материала, на сорбцию на гетерогенной поверхности (модель Фрейндлиха), для модифицированного материала, при обработке сорбционного материала 3%-ным раствором серной кислоты также подтверждается результатами обработки изотерм адсорбции ионов железа (III) нативным и модифицированным листовым опадом тополя в рамках четырех наиболее распространенных мономолекулярных моделей [28]: Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина (табл. 2).

Таблица 2.  
Результаты обработки изотерм адсорбции ионов железа (III) нативным и модифицированным листовым опадом тополя в рамках мономолекулярных моделей сорбции

| Модель адсорбции            | Нативный листовой опад тополя          | Модифицированный листовой опад тополя  |
|-----------------------------|--|--|
| Модель Ленгмюра             | $y = 8,881x + 10,30$<br>$R^2 = 0,976$  | $y = 4,108x + 12,42$<br>$R^2 = 0,845$  |
| Модель Фрейндлиха           | $y = 0,445x - 1,409$<br>$R^2 = 0,886$  | $y = 0,650x - 1,168$<br>$R^2 = 0,964$  |
| Модель Дубинина-Радушкевича | $y = -4,299x - 2,214$<br>$R^2 = 0,788$ | $y = -2,346x - 1,736$<br>$R^2 = 0,572$ |
| Модель Темкина              | $y = 0,020x + 0,054$<br>$R^2 = 0,970$  | $y = 0,067x + 0,134$<br>$R^2 = 0,903$  |

Используя константы уравнений сорбции Ленгмюра и Дубинина-Радушкевича рассчитаны значения энергий сорбции и энергий Гиббса исследуемых процессов (табл. 3). При модификации опилок растворами серной кислоты наблюдается увеличение значения  $\Delta G$  (увеличение отрицательного значения по модулю), т.е. процесс адсорбции становится более предпочтительным [29].

Таблица 3.  
Термодинамические константы процессов адсорбции ионов Fe<sup>3+</sup> нативной листвой тополя и обработанного 3 %-ным раствором серной кислоты

| Адсорбент                              | E, кДж/моль | $\Delta G$ , кДж/моль |
|--|-------------|-----------------------|
| До модификации                         | 1.243       | -2.011                |
| 3 % p-p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 1.590       | -2.696                |

Значения энергий сорбции (E) в пределах от 0 до 2 кДж/моль свидетельствуют о протекании физической адсорбции. А отрицательные значения  $\Delta G$  в пределах от -3 до 0 кДж/моль соответствуют самопроизвольному протеканию физической адсорбции как для нативного, так и для модифицированного материала [30].

С целью выявления лимитирующей стадии процесса получены кинетические зависимости процессов сорбции ионов Fe<sup>3+</sup> нативными и модифицированными листьями тополя (рисунок 3).

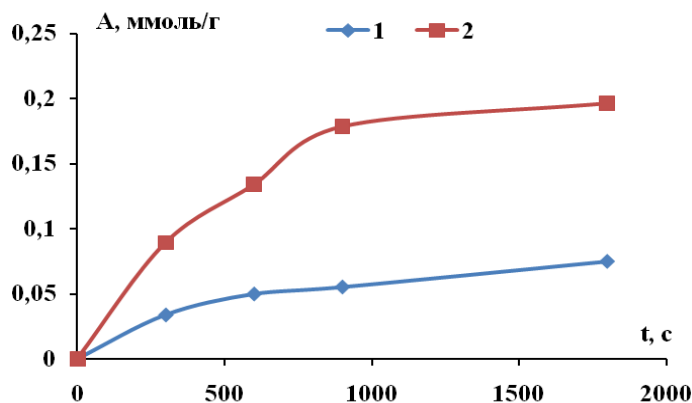


Рис. 3. Кинетические зависимости процессов сорбции ионов  $Fe^{3+}$ :  
1 – исходным и 2 – модифицированным 3 %-ным раствором  $H_2SO_4$  листовым опадом тополя

Обработкой полученных изотерм сорбции в рамках диффузионной кинетической модели сорбции (модель Бойда) определены константы внешней и внутренней диффузии, а также коэффициент Био, характеризующий вклад внешней и внутренней диффузии в процессе сорбции ионов железа (III) нативной и модифицированной листвой тополя (таблица 4).

Таблица 4.

Результаты обработки кинетических зависимостей процессов сорбции ионов  $Fe^{3+}$  нативной листвой тополя и обработанного 3 %-ным раствором серной кислоты в рамках диффузионной модели Бойда

| Сорбент                        | $D_{вн} \cdot 10^9$ | $D_i \cdot 10^6$ | $Bi$  | Вывод              |
|--------------------------------|---------------------|------------------|-------|--------------------|
| Нативная листва тополя         | 3,2-8,6             | 8                | 2,191 | Смешанная диффузия |
| Модифицированная листва тополя | 4,4-14              | 5                | 1,643 | Смешанная диффузия |

## ВЫВОДЫ

В статических условиях изучены сорбционные свойства нативной листвой тополя и обработанного 3 %-ным раствором серной кислоты по отношению к ионам  $Fe^{3+}$ . Максимальная сорбционная ёмкость нативной листвы тополя по отношению к ионам железа (III) составила 7,0 мг/г (0,11 ммоль/г), модифицированного листового опада – 22,7 мг/г (0,36 ммоль/г). Результаты обработки изотерм адсорбции в рамках мономолекулярных моделей: Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина, а также ИК-спектры и элементный состав нативных и модифицированных листьев тополя свидетельствуют об образовании активных центров с большей сорбционной ёмкостью по отношению к ионам железа (III) по сравнению с другими участками поверхности сорбента. Термодинамические параметры процессов: энергия сорбции и энергия Гиббса соответствуют самопроизвольному протеканию физической адсорбции как для нативного, так и для модифицированного материала. Обработкой кинетических зависимостей процессов сорбции в рамках диффузионной модели Бойда, установлено, что лимитирующей стадией процесса является смешанная диффузия, то есть в общий вклад процесса сорбции вносит свою роль как внешняя, так и внутренняя диффузия.

*Материал подготовлен при поддержке центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Chakraborty, R. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review / R. Chakraborty, A. Asthana, A.K. Singh, B. Jain, A.B.H. Susan // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2020. – P. 1-38.
2. Joseph, L. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review / L. Joseph, B. Jun, J.R.V. Flora, C.M. Park, Y. Yoon // Chemosphere. – 2019. – Vol. 229. – P. 142-159.
3. Islamuddin, G. Study of eco-friendly agricultural wastes as non-conventional low cost adsorbents: A review / G. Islamuddin, M.A. Khalid, S.A. Ahmad // Ukrainian Journal of Ecology. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – P. 68-75.
4. Malik, D.S. Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: a review / D.S. Malik, C.K. Jain, A.K. Yadav // Applied Water Science. – 2017. – Vol. 7. – Is. 5. – P. 2113-2136.

5. Geremew, B. A Review on Elimination of Heavy Metals from Wastewater Using Agricultural Wastes as Adsorbents / B. Geremew // Science Journal of Analytical Chemistry. – 2017. – Vol. 5. – Is. 5. – P. 72-75.
6. Fazullin, D.D. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal ions from aqueous media / D.D. Fazullin, D.A. Kharlyamov, G.V. Mavrin, A.A. Alekseeva, S.V. Stepanova, I.G. Shaikhiev, A.S. Shaimardanova // International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. – Т. 8. – № 2. – P. 14375-14391.
7. Шайхиев, И.Г. Кератинсодержащие отходы птицеводства как сорбционные материалы для удаления поллютантов из водных сред. 1. Извлечение ионов металлов / И.Г. Шайхиев, К.И. Шайхиева // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 445-449.
8. Свергузова, С.В. Тяжелые металлы в окружающей среде и их трансформация / С.В. Свергузова, Л. Хунади, Ю.С. Воронина // Chemical Bulletin. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 9-14.
9. Шайхиев, И.Г. Шерсть и отходы ее переработки в качестве сорбционных материалов. 1. Неорганических ионов металлов и анионов / И.Г. Шайхиев // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 21. – С. 139-150.
10. Юсупова, А.И. Сорбционная очистка модельных растворов от ионов железа (III) опилками коры и листвой дуба черешчатого (*Quercus robur*) / А.И. Юсупова, Р.З. Галимова, И.Г. Шайхиев, С.В. Свергузова // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 6. – С. 77-82.
11. Свергузова, С.В. Сорбционная очистка модельного раствора от ионов Fe<sup>3+</sup> биомассой скорлупы арахиса / С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, Л. Хунади, Е.С. Иевлева, Ю.С. Воронина // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 58-63.
12. Najim, T.S. Adsorption of copper and iron using low cost material as adsorbent / T.S. Najim, N.J. Elais, A.A. Dawood // E-Journal of Chemistry. – 2009. – Vol. 6. – № 1. – P. 161-168.
13. Abdulrasaq, O.O. Removal of copper (II), iron (III) and lead (II) ions from mono-component simulated waste effluent by adsorption on coconut husk / O.O. Abdulrasaq, O.G. Basiru // African Journal of Environmental Science and Technology. – 2010. – Vol. 4. – № 6. – P. 382-387.
14. Ahalya, N. Cr (VI) and Fe (III) removal using Cajanuscajan husk / N. Ahalya, R.D. Kanamadi, T.V. Ramachandra // Journal of Environmental Biology. – 2007. – Vol. 28. – № 4. – P. 765-769.
15. Deka, L. Comparative equilibrium studies on the removal of Fe(III) from aqueous phase by low cost adsorbents / L. Deka, K.G. Bhattacharyya // Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Science. – 2018. – Vol.4. – № 2. – P. 81-93.
16. Senin, H.B. Role of sawdust in the removal of iron from aqueous solution / H.B. Senin, O. Subhi, R. Rosliza, N. Kancono, M.S. Azhar, S. Hasiyah, W.B. Nik // Asian Journal on Science and Technology for Development. – 2006. – Vol. 23. – № 3. – P. 223-229.
17. Mohammed, A.A. Adsorption kinetic and mechanistic view of aqueous ferric ion onto bio-natural rice grains / A.A. Mohammed // Membrane Water Treatment. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 73-88.
18. Balintova, M. A study of sorption heavy metals by natural organic sorbents / M. Balintova, S. Demcak, B. Pagacova // International Journal of Energy and Environment. – 2016. – Vol. 10. – P. 189-194.
19. Kovacova, Z. Removal of copper, zinc and iron from water solutions by spruce sawdust adsorption / Z. Kovacova, S. Demcak, M. Balintova // Ekonomia I Srodowisko. – 2019. – № 3(70). – P. 64-74.
20. Шаймарданова, А.Ш. Использование химических реагентов для увеличения сорбционной емкости листового опада по отношению к ионам железа (II) / А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2015. – № 3. – С. 31-35.
21. Шаймарданова, А.Ш. Влияние параметров плазменной обработки на сорбционные свойства березового опада по отношению к ионам железа / А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова, И.Г. Шайхиев, И.Ш. Абдуллин // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 15. – С. 253-256.
22. Шаймарданова, А.Ш. Физико-химические основы удаления ионов железа из модельных растворов березовым опадом / А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова, И.Г. Шайхиев // Вода: химия и экология. – 2016. – № 1(91). – С. 53-59.
23. Шаймарданова, А.Ш. Исследование возможности многократного использования листового опада в качестве сорбционного материала по отношению к ионам железа / А.Ш. Шаймарданова, С.В. Степанова, И.Г. Шайхиев // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. – 2017. – № 2(21). – С. 172-180.

24. Латыпова, Л.Ф. Оценка сорбционных показателей листы деревьев по ионам Fe(III)/ Л.Ф. Латыпова, И.Г. Шайхiev, Д.Д. Фазуллин, С.В. Свергузова // Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды: сб. докладов Междунар. науч.-техн. конф. (Алушта, 3-7 июня 2019 г.). – Белгород: изд-во БГТУ, 2019. – Ч.1. – С. 213-216.

25. Kumar, A. Alkali-treated straw and insoluble straw xanthate as low cost adsorbents for heavy metal removal – preparation, characterization and application / A. Kumar, N.N. Rao, S.N. Kaul // *Bioresource Technology*. – 2000. – Vol. 71. – P. 133-142.

26. Галимова, Р.З. Обработка результатов исследования процессов адсорбции с использованием программного обеспечения Microsoft Excel: практикум: учебное пособие. / Р.З. Галимова, И.Г. Шайхiev, С.В. Свергузова. – Казань; Белгород. Изд-во БГТУ, 2017. – 60 с.

27. Галимова, Р.З. Получение и исследование сорбционных свойств модифицированных целлюлозосодержащих сорбционных материалов по отношению к фенолу / Р.З. Галимова, И.Г. Шайхiev // *Вода: химия и экология*. – 2017. – № 2. – С. 60-66.

28. Denisova, T.R. Investigation of phenol adsorption on barley husk modified by low-concentrated sul-furic acid solutions / T.R. Denisova, R.Z. Galimova, I.R. Nizameev, I.G. Shaikhiev et al. // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2017. – vol. 9. – № 1S. – P. 1480-1490.

29. Denisova, T.R. Study of kinetic - thermodynamic aspects of phenol adsorption on natural sorption materials / T.R. Denisova, R.Z. Galimova, I.G. Shaikhiev, G.V. Mavrin // *Reserch Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2016. – Vol. 7. – № 5. – P. 1765-1771.

30. Галимова, Р.З. Исследование кинетики процессов адсорбции фенола отходами валяльно-войлочного производства / Р.З. Галимова, И.Г. Шайхiev, Г.А. Алмазова, С.В. Свергузова // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2016. – № 10. – С. 179-184.

## KINETICS OF IRON (III) ION SORPTION FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY NATIVE AND MODIFIED POPLAR LEAF

R.Z. Galimova<sup>1</sup>, L.F. Latypova<sup>2</sup>, I.G. Shaikhiev<sup>3</sup>, S.V. Sverguzova<sup>4</sup>, Y.S. Voronina<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Kazan National Research Technological University;

<sup>4,5</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

**Annotation.** A modified sorption material based on poplar leaf litter was obtained by surface treatment with a 3% sulfuric acid solution. The sorption properties of native and modified leaf litter with respect to iron (III) ions have been studied under static conditions at a temperature of 20°C. The maximum sorption capacity of native and modified leaf litter with respect to Fe<sup>3+</sup> ions is 7.0 mg/g and 22.7 mg/g, respectively. The obtained adsorption isotherms correspond to the I-type isotherms according to the IUPAC classification or the L-type according to the Gils classification and describe the monolayer adsorption of iron (III) ions on the sorption material. The results of processing adsorption isotherms within the framework of the four most common monomolecular models: Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, and Temkin, as well as IR spectra and elemental composition of native and modified poplar leaves indicate the formation of active centers with a higher sorption capacity in relation to iron ions (III) in comparison with other areas of the sorbent surface. Using the constants of the Langmuir and Dubinin-Radushkevich equations for the processes under study, the values of the sorption energies and Gibbs energies of the process are calculated, which correspond to the spontaneous occurrence of physical adsorption both in the case of native and modified materials. The kinetics of adsorption of Fe<sup>3+</sup> ions by native and modified poplar leaves in weakly concentrated (3%) solutions of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was studied. By processing the kinetic dependences of sorption processes in the framework of Boyd's diffusion model, it was found that the limiting stage of the process is mixed diffusion, that is, both external and internal diffusion make their role in the overall contribution of the sorption process.

**Key words:** Fe<sup>3+</sup> ions, poplar foliage, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, processing, adsorption