






Сорбция аммония волокнистым сорбентом ВИОН КН-1






Сабухи И. Нифталиев ¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Елена М. Горбунова ¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Анна В. Тимкова ¹	timkova.anna@mail.ru	 0000-0003-0630-2993
Ксения Б. Ким ¹	kmkseniya@ya.ru	 0000-0001-5564-8267
Владимир Н. Данилов ¹	v_dan62@mail.ru	 0000-0001-7106-6638

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований сорбционного извлечения ионов аммония из водных сред волокнистым сорбентом ВИОН КН-1. Слабокислотное ионообменное волокно ВИОН КН-1 обладает развитой поверхностью, хорошей способностью к набуханию, высокой скоростью сорбции и большой устойчивостью к истиранию движущимся потоком. Установлено, что лимитирующей стадией процесса сорбции ионов аммония является внутренняя диффузия. Рассчитаны кинетические параметры процесса сорбции, с увеличением концентрации уменьшается время полусорбции и увеличивается коэффициент внутренней диффузии. Проведено сравнительное исследование применимости моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для описания экспериментальных изотерм сорбции ионов аммония волокном. Определены константы и параметры этих уравнений. Путем сопоставления коэффициентов регрессии R^2 показано, что модель Ленгмюра лучше описывает экспериментальные данные по сорбции ионов аммония волокнистым сорбентом. Проведено исследование сорбции в динамических условиях. По кривым зависимости степени извлечения от концентрации и от объема пропущенного раствора установлено, что с уменьшением концентрации в динамическом режиме сорбционные характеристики волокон не уменьшаются, что делает их использование целесообразным при очистке разбавленных растворов, содержащих ионы аммония. При низких концентрациях ионов аммония в исходном растворе степень извлечения составляет более 93%. Для прогнозирования степени извлечения ионов аммония из сточных вод применили автоматизированную нейронную сеть пакета прикладных программ STATISTICA. Входными параметрами для обучения нейронной сети были выбраны: концентрация ионов аммония, объем пропущенного раствора через слой сорбента и масса навески волокна. Выходной параметр – степень извлечения ионов аммония. Обученная нейронная сеть MPL-3-5-1 имеет высокие коэффициенты детерминации для обучающей, тестовой и контрольной выборок, что определяет высокую производительность обученной сети и может использоваться для прогноза степени извлечения ионов аммония волокнистым сорбентом ВИОН КН-1.

Ключевые слова: очистка, сточные воды, хемосорбция, ионы аммония, ионообменное волокно, нейронные сети, многослойный перцептрон, ионы аммония.

Sorption of ammonium by fibrous sorbent VION KN-1

Sabukhi I. Niftaliev ¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Elena M. Gorbunova ¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Anna V. Timkova ¹	timkova.anna@mail.ru	 0000-0003-0630-2993
Kseniya B. Kim ¹	kmkseniya@ya.ru	 0000-0001-5564-8267
Vladimir N. Danilov ¹	v_dan62@mail.ru	 0000-0001-7106-6638

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The results of studies of the sorption extraction of ammonium ions from aqueous media by the fibrous sorbent VION KN-1 are presented. Weak acid ion exchange fiber. It has been established that the limiting step in the process of ammonium ion sorption is internal diffusion. The kinetic parameters of the sorption process are calculated, with the identification of a decrease in the half-sorption time and an increase in the internal diffusion coefficient. The applicability of the Langmuir and Freundlich models for describing the experimental isotherms of ammonium ion sorption by fiber has been studied. Certain constants and parameters. Through the appearance of regression coefficients, R^2 showed that the Langmuir model better explores experimental data on the sorption of ammonium ions by a fibrous sorbent. A study of sorption in media was carried out. According to the curves of the dependence of the degree of extraction on the concentration and on the depth of the missed solution, it was found that with a decrease in concentration in the dynamic sorption mechanism, the reduction characteristics do not decrease, which makes their use reduced in the purification of dilute solutions containing ammonium ions. At a low concentration of ammonium ions in the initial solution, the degree of extraction is more than 93%. To predict the extraction of ammonium ions from wastewater, an increased concentration of neural packages of STATISTICA application programs was used. The input parameters for studying the neural network were chosen: the concentration of ammonium ions, the volume of the solution passed through the sorbent layer, and the weight of the sample of fibers. The output parameter is the degree of extraction of ammonium ions. The trained MPL-3-5-1 neural network has high coefficients of determination for the training, test and control samples, which gives a high estimate of the network performance and can predict the degree of extraction of ammonium ions by the fibrous sorbent VION KN-1.

Keywords: purification, waste water, chemisorption, ammonium ions, ion exchange fiber, neural networks, multilayer perceptron, ammonium ions.

Для цитирования

Нифталиев С.И., Горбунова Е.М., Тимкова А.В., Ким К.Б., Данилов В.Н. Сорбция аммония волокнистым сорбентом ВИОН КН-1 // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 221–232. doi:10.20914/2310-1202-2023-1-221-232

For citation

Niftaliev S.I., Gorbunova E.M., Timkova A.V., Kim K.B., Danilov V.N. Sorption of ammonium by fibrous sorbent VION KN-1. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 221–232. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-1-221-232

Введение

В связи с возрастающими потребностями человечества в продуктах питания и острой необходимости повышения плодородия почвы, мировое производство минеральных удобрений развивается относительно высокими темпами, значительно превышающими средние темпы производства остальной промышленной продукции. Значение азотных удобрений резко возрастает при современной интенсивной системе земледелия, особенно при выращивании высокоурожайных и наиболее требовательных к условиям питания технических культур [1, 2].

При производстве азотсодержащих минеральных удобрений в большом количестве образуются сточные воды, которые нуждаются в дополнительной обработке перед сбросом в открытые водоемы [3].

Перспективным способом выделения катионов аммония является ионообменная сорбция [4–7]. Сорбционная очистка может применяться самостоятельно и совместно с биологической, как метод предварительной и глубокой очистки. Такой метод используется, когда существуют высокие требования к составу воды. Преимуществами этого метода являются возможность поглощения веществ из многокомпонентных смесей и высокая степень очистки, особенно слабо концентрированных сточных вод.

Одним из видов ионообменного материала является ионообменное волокно. Волокнистые сорбенты обладают превосходными кинетическими характеристиками, обусловленными их физико-химическим строением. К их основным достоинствам можно отнести высокую удельную поверхность, способность к набуханию, механическую прочность и удобство использования. При применении волокон в качестве сорбентов реализуются не только электростатические взаимодействия, но и координационные, водородные связи, различные типы межмолекулярного притяжения [8].

Анионообменное волокно получают из полиакрилонитрильного (ПАН) волокна, химически сшитого гидразином. Нитрильные группы на поверхности полимера ПАН могут участвовать в различных химических реакциях [9]. Ионообменные волокна не ухудшают свои свойства при механических, термических воздействиях, а также показали устойчивость в растворах перекиси водорода, сильных кислотах и щелочах различной концентрации [9]. ПАН волокно успешно используется для удаления из сточных вод As(V) [10]. В работе [11] предложено использовать ионообменное волокно для извлечения катионов меди (II) и никеля (II) на стадии доочистки сточных вод гальванического производства.

Ионообменные волокна на основе полиакрилонитрила используются для высокоэффективного извлечения U(VI) из реальных урановых шахтных вод [12].

Учитывая свойства волокнистых сорбентов, они заслуживают особое внимание, при использовании в процессах очистки сточных вод. Высокая скорость сорбции обусловлена исключительно коротким диффузионным путем от поверхности к середине волокна, что компенсирует более медленную внутреннюю диффузию. Однако, как следует из литературных данных, систематических исследований по удалению ионов аммония с использованием волокнистых сорбентов не проведено (практически отсутствуют).

Цель работы – изучение кинетики сорбции катионов аммония из водных растворов на волокнистом карбоксильном сорбенте ВИОН КН-1, выявление лимитирующей стадии процесса, влияние высоты слоя волокна на степень извлечения ионов аммония, а также обучение искусственной нейронной сети для прогнозирования степени извлечения ионов аммония из сточных вод с использованием пакета прикладных программ Statistica Neural Networks версия 13.

Материалы и методы

Объектом исследования являлось ионообменное волокно ВИОН КН-1. Критериями выбора волокна ВИОН КН-1 являлись его характеристики, такие как, развитая поверхность, что облегчает доступ реагентов к обменным центрам волокна; лучшая способность к набуханию; высокая скорость сорбции и большая устойчивость к истиранию движущимся потоком. Для регенерации волокнистых ионообменников требуется меньше регенерирующего раствора по сравнению с зернистыми ионитами [13]. В связи с этим волокна широко используются в сорбции различных ионов [14–16].

Слабокислотное ионообменное волокно ВИОН КН-1 получено на основе полиакрилонитрильного волокна. Радиус хемосорбционного волокна ПАН = 11×10^{-6} м. Сорбция водяных паров волокном нитрон при относительной влажности воздуха 65 % равна 0.8–1.5 мас. %, а при 95 % – 1.5–3.5 мас. %. Набухание волокна в воде составляет 3–6 мас. %. Функциональными группами ионита являются карбоксилсодержащие группы – COO – (H^+ или Na^+ формы)

Хемосорбционное волокно обладает следующими характеристиками: статическая обменная емкость (СОЕ) 3,5–5,0 мг-экв/г, линейная плотность 0,6–0,8 текс, разрывная нагрузка 3,5–10,0 сН/текс, разрывное удлинение 25–40 %, поверхностная плотность 250–800 г/м², рКа = 7,2.

Стандартный раствор, содержащий 0,1 моль/дм³ ионов аммония, готовили из фиксаля. Рабочие растворы аммонийного азота готовили из исходных растворов путем последовательного разбавления. Исследовали равновесие и кинетику сорбции ионов аммония в статических условиях из водных растворов хлорида аммония при перемешивании и температуре 298 К.

Концентрацию ионов аммония в растворе определяли на иономере И-130 с ионоселективным электродом по градуировочному графику (зависимость напряжения от логарифма молярной концентрации).

Кинетику сорбции исследовали методом ограниченного объема раствора [18]. Для получения кинетических кривых сорбции в стакан залили 100 см³ раствора хлорида аммония с начальными концентрациями от 2 до 12 ммоль/дм³ и помещали туда навеску волокна 0,3 ± 0,0002 г. Изменение концентрации ионов аммония от времени определяли методом потенциометрии.

Для определения лимитирующей стадии процесса, полученные кинетические зависимости, представляли в координатах уравнений Бойда–Адамсона для случая внутренней и внешней диффузии. Для определения вклада внутренней диффузии проанализирована зависимость степени превращения F от времени сорбции τ (F-√τ) для внутренней диффузии, где F = C_т/C_{е_{max}}, C_т – сорбционная емкость волокна за определенное время сорбции, C_{е_{max}} – максимальная сорбционная емкость волокна. Линейность зависимостей в данных координатах свидетельствует о вкладе внутренней диффузии. Для оценки влияния внешней диффузии кинетические кривые сорбции были рассмотрены в координатах – ln(1-F) = f(τ). Линейность этой зависимости свидетельствует о вкладе внутренней диффузии.

Степень извлечения ионов аммония (R) из раствора рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{(C_n - C_p)}{C_n} \cdot 100\% \tag{1}$$

где C_н – начальная концентрации ионов металла в растворе, ммоль/дм³; C_р – равновесная концентрация ионов металла в растворе после сорбции, ммоль/дм³.

Сорбционную емкость хемосорбционного волокна (CE) (ммоль/г) по аммонийному азоту находили по формуле:

$$CE = \frac{(C_n - C_p) \cdot V}{1000 \cdot m} \tag{2}$$

где V – объем раствора, см³; m – навеска волокна, г.

Значение коэффициента распределения K_d (см³/г) рассчитывали для количественной

оценки распределения аммония между волокном и раствором:

$$K_d = \frac{R}{100 - R} \cdot \frac{V}{m} \tag{3}$$

Одним из наиболее часто используемых и эффективных вариантов процесса сорбции является пропускание сточной воды через неподвижный слой ионита (колонку или фильтр). Для исследования сорбции в динамических условиях фильтр заполняли навесками ионообменного волокна от 0,31 до 0,93 г. Раствор, содержащий ионы аммония известной концентрации, пропускали через фильтр с определенной скоростью. Содержание аммонийного азота в порциях фильтрата (50 см³) на выходе из фильтра определяли потенциометрическим методом. Пропускание раствора прекращали, когда концентрация ионов аммония в фильтрате становилась равной исходной концентрации. По полученным данным строили выходные кривые в координатах C_р/C_н = f(V).

С целью прогнозирования степени извлечения ионов аммония из сточных вод экспериментальные данные были обработаны с использованием пакета прикладных программ Statistica Neural Networks. Учитывая результаты предварительных экспериментов, осуществлен отбор основных переменных параметров, оказывающих значимое влияние на сорбцию ионов. Входные параметры: концентрация загрязняющего вещества, ммоль/дм³; объем пропускаемого раствора, дм³; масса волокна, г. Функцией отклика (выходным параметром) являлась степень извлечения, %. По полученным данным строили нейросетевые модели [19].

В качестве стратегии построения моделей была выбрана автоматизированная нейронная сеть со следующими настройками, представленными в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика нейронной сети

Table 1.

Characteristics of the neural network

Тип сети Network type	Многослойный перцептрон Multilayer Perceptron
min количество скрытых нейронов min number of hidden neurons	3
max количество скрытых нейронов max number of hidden neurons	10
Коэффициент детерминации выборок Coefficient of determination of samples:	
– обучающая / training	0,999420
– тестовая / test	0,998767
– контрольная / control	0,998572
Алгоритм обучения Training algorithm	BFGS (второго порядка точности) (second order accuracy)

Результаты

Полученные экспериментальные данные по сорбции ионов аммония волокнистым сорбентом ВИОН КН-1 из растворов с разным содержанием аммонийного азота приведены в таблице 2. Как видно из таблицы максимальное значение сорбционной емкости сорбентов ВИОН КН-1 при заданной концентрации по ионам аммония составляет 2,47 ммоль/г. При сорбции из разбавленных растворов значения коэффициентов распределения (K_d) находится на уровне $2,3 \times 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$, что значительно превышает значения для зернистых ионитов.

Таблица 2.

Сорбционные свойства волокнистого сорбента ВИОН КН-1 при извлечении ионов аммония

Table 2.

Sorption properties of the fibrous sorbent VION KN-1 during the extraction of ammonium ions

Показатель Index	Значения Meanings			
C_n , ммоль/дм ³ mmol/dm ³	1,79	4,79	7,56	11,3
C_p , ммоль/дм ³ mmol/dm ³	0,23	0,85	1,77	3,9
СЕ, ммоль/г mmol/g	0,52	1,31	1,93	2,47
R, %	87,25	82,30	76,59	65,49
K_d , см ³ /г cm ³ /g	2281,07	1549,53	1090,40	632,48

Степень извлечения (R) ионов аммония с уменьшением концентрации увеличивается, что свидетельствует об эффективности волокна для доочистки разбавленных стоков до ПДК. Такие показатели степени извлечения (меньше 90 %) можно объяснить тем, что подобранное соотношение объема раствора и навески волокна ($330 \text{ см}^3/\text{г}$) не является оптимальным соотношением параметров: объем раствора – навеска ионита – концентрация загрязняющего вещества.

Методом переменных концентрации построены изотермы сорбции для оценки средства исследуемых волокнистых ионитов к ионам аммония. Для этого применяли равновесные концентрации, представляющие собой остаточную концентрацию ионов аммония в растворе после насыщения волокнистого сорбента.

Изотермы сорбции ионов аммония ионообменным волокном в координатах $CE = f(C_p)$ (рисунок 3) имеет вид выпуклой кривой. Начальный участок является близким к линейному (участок Генри). Величина сорбции практически пропорциональна концентрации ионов аммония на этом участке. То есть при малых концентрациях ($C_p < 1 \text{ ммоль/дм}^3$) в растворе происходит практически количественная сорбция.

Модели Ленгмюра и Фрейндлиха были применены для количественного описания равновесного процесса сорбции ионов аммония.

Изотермы сорбции сорбентом ВИОН КН-1 линеаризуются в координатах уравнения Ленгмюра ($R^2 = 0,999$). Установлено, что сорбция имеет монослойный характер и максимум ее достигается при полном заполнении монослоя, а также на отсутствии взаимодействия между сорбированными ионами. Значения входящих в уравнения моделей Ленгмюра и Фрейндлиха параметров, а также коэффициенты корреляции представлены в таблице 3.

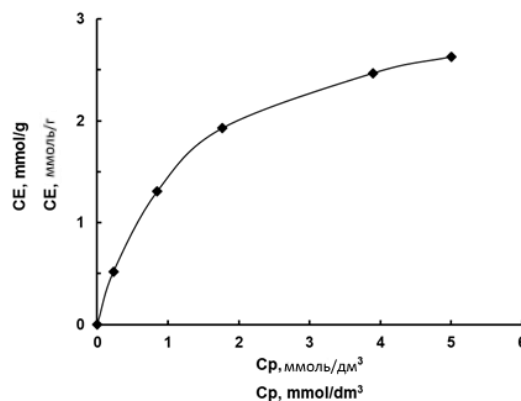


Рисунок 1. Изотермы сорбции ионов аммония волокнами ВИОН КН-1

Figure 1. Isotherms of sorption of ammonium ions by the fibers VION KN-1

Модели Ленгмюра и Фрейндлиха были применены для количественного описания равновесного процесса сорбции ионов аммония. Изотермы сорбции сорбентом ВИОН КН-1 линеаризуются в координатах уравнения Ленгмюра ($R^2 = 0,999$). Установлено, что сорбция имеет монослойный характер и максимум ее достигается при полном заполнении монослоя, а также на отсутствии взаимодействия между сорбированными ионами. Значения входящих в уравнения моделей Ленгмюра и Фрейндлиха параметров, а также коэффициенты корреляции представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Модели и константы изотерм сорбции

Table 3.

Models and constants of sorption isotherms

Модель Ленгмюра / Langmuir model		
СЕ ₀₀ , ммоль/г mmol/g	K_L , дм ³ /ммоль K_L , dm ³ /mmol	R ²
3,1898	0,8526	0,9999
Модель Фрейндлиха / Freundlich model		
K_f , ммоль/г K_F , mmol/g	1/n	R ²
1,2596	0,5214	0,9665

Построена зависимость сорбционной емкости ионитов от исходной концентрации ионов аммония в обратных координатах $1/CE = f(C_n)$ (рисунок 5). Эту зависимость можно использовать для получения аналитического уравнения, позволяющего прогнозировать сорбционную емкость волокнистых сорбентов.

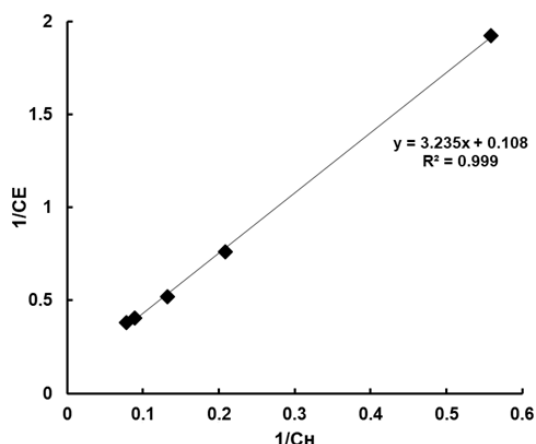


Рисунок 2. Зависимость сорбционной емкости волокнистых сорбентов от содержания аммонийного азота в растворе в обратных координатах

Figure 2. The dependence of the sorption capacity of fibrous sorbents on the content of ammonium nitrogen in the solution in the inverse coordinates

На основании полученных прямолинейных зависимостей с высокой достоверностью рассчитаны значения констант CE_{00} и K_L . При внесении констант в уравнение Ленгмюра получаем аналитические уравнения для прогноза сорбционной емкости ВИОН КН-1.

$$C_E = 10,32 \cdot \frac{0,02975 \cdot C_n}{1 + 0,02975 \cdot C_n} \quad (4)$$

Полученное уравнение позволяет определить сорбционную емкость исследуемого волокна по отношению к ионам аммония при любой исходной концентрации. Рассчитанное по приведенному уравнению значение сорбционной емкости при варьировании исходного содержания аммонийного азота хорошо коррелирует с экспериментально полученными данными (таблица 4).

Таблица 4.

Расчетные и экспериментальные данные сорбционных емкостей волокнистого сорбента ВИОН КН-1 по ионам аммония

Table 4.

The calculated and experimental data on the sorption capacities of the fibrous sorbent VION KN-1 for ammonium ions

C_n , ммоль/дм ³ C_n , mmol/dm ³	Значение CE , ммоль/г CE value, mmol/g	
	Расчетное Estimated	Экспериментальное Experimental
1,79	0,52	0,52
4,79	1,29	1,31
7,56	1,90	1,93
11,3	2,59	2,46

Для определения оптимального соотношения объема раствора к массе волокнистых сорбентов построена зависимость степени извлечения ионов аммония от гидромодуля (рисунок 4).

Как видно из зависимостей при уменьшении соотношения объем раствора к массе волокон (гидромодуля) увеличивается степень извлечения. При этом не достигается полное извлечения ионов аммония (меньше 90 %). Это обусловлена тем, что процесс сорбции проведен при более высокой начальной концентрации ионов аммония в растворе ($C_n = 10$ ммоль/дм³).

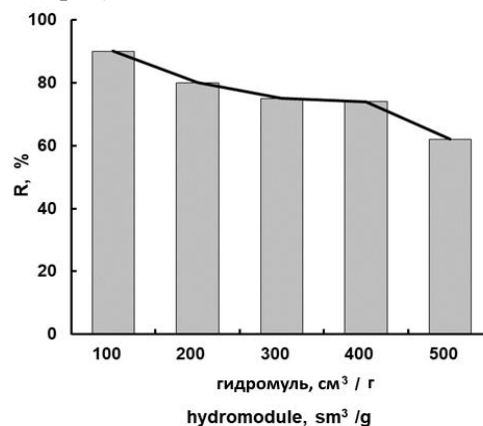


Рисунок 3. Влияние гидромодуля на степень извлечения ионов аммония

Figure 3. Effect of the hydromodule on the degree of recovery of ammonium ions

Таким образом, при очистки сточной воды с высоким содержанием ионов аммония (10 ммоль/дм³) необходим двухступенчатый процесс. При более низких концентрациях ионов аммония с помощью исследуемого волокна можно очистить воду до значения ПДК.

Также в работе была исследована кинетика сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1. Время установления равновесия в системе ионит-раствор является важным кинетическим параметром. Оно характеризует скорость сорбционного процесса. Кинетические кривые сорбции ионов аммония сорбентом ВИОН КН-1 представлены на рисунке 5.

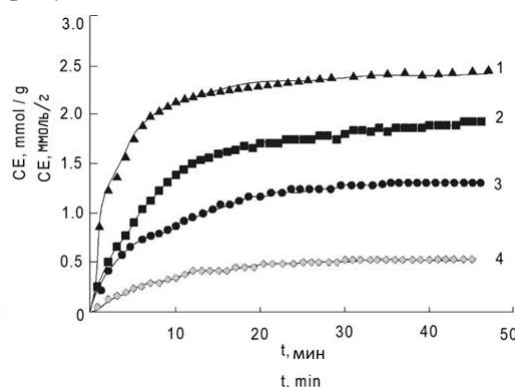


Рисунок 4. Кинетика сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1. Концентрация внешнего раствора 1–11,3; 2–7,55; 3–4,72; 4–1,78 ммоль/дм³, соответственно

Figure 4. Kinetics of ammonium ion sorption by VION KN-1 fiber. The concentration of the external solution is 1–11,3; 2–7,55; 3–4,72; 4–1,78 mmol/dm³, respectively

Как видно из рисунка 5, скорость сорбции на волокнистом сорбенте ВИОН КН-1 максимальна в течение первых 10 минут соответственно. С увеличением концентрации внешнего раствора возрастает время достижения состояния равновесия и величина сорбционной емкости.

Для определения вклада внутренней диффузии были получены и проанализированы зависимости степени превращения F от \sqrt{t} (рисунок 6). При малых степенях заполнения линейность графика в данных координатах свидетельствует о вкладе внутренней диффузии для обоих ионитов. Как отмечено в монографии [49] для ионообменного материала в форме цилиндра линейность должна соблюдаться с практической точностью при $F \sim 0.5$. Кривые, приведенные на рисунке 6, удовлетворяют данное требование.

Для оценки влияния внешней диффузии были получены и проанализированы кинетические кривые сорбции в координатах $-\ln(1-F) = f(t)$ при разных степенях заполнения волокнистых сорбентов (рисунок 7). Как видно из рисунка 7 линейность не соблюдается. Это свидетельствует об меньшем вкладе внешней диффузии на общую скорость процесса. Поэтому можно предположить, что существенный вклад на скорость процесса сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1 при исследуемых концентрациях вносить именно внутренняя диффузия.

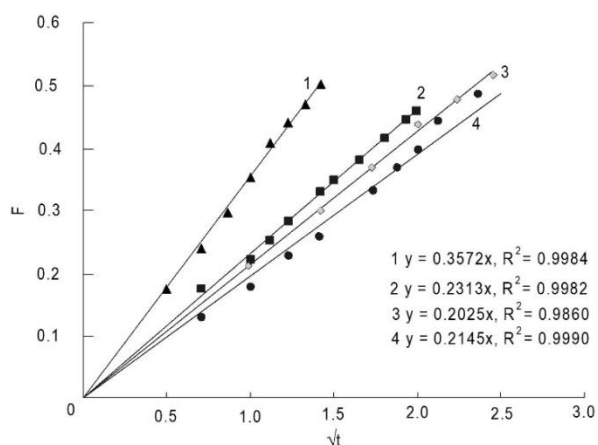


Рисунок 5. Кинетические кривые сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1 в координатах уравнений Бойда–Адамсона для случая внутренней диффузии. Концентрация внешнего раствора 1–11,3; 2 – 7,55; 3–4,72; 4–1,78 ммоль/дм³, соответственно

Figure 5. Kinetic curves of ammonium ion sorption by VION KN-1 fiber in the coordinates of the Boyd-Adamson equations for the case of internal diffusion. The concentrations of external solutions: 1 – 11,3; 2–7,55; 3–4,72; 4 – 1,78 mmol / dm³, respectively

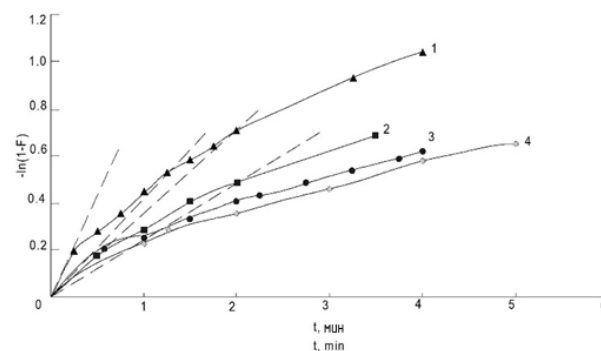


Рисунок 6. Кинетические кривые сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1 в координатах уравнений Бойда–Адамсона для случая внешней диффузии. Концентрация внешнего раствора 1–11,3; 2 – 7,55; 3–4,72; 4–1,78 ммоль/дм³, соответственно

Figure 6. Kinetic curves of ammonium ion sorption by VION KN-1 fiber in the coordinates of the Boyd-Adamson equations for the case of external diffusion. The concentration of the external solution is 1–11,3; 2–7,55; 3–4,72; 4–1,78 mmol/dm³, respectively

Для того чтобы удостовериться в том, что сорбция волокном ВИОН КН-1 лимитируется внутридиффузионными ограничения применен метод с прерыванием контакта ионит-раствор, описанный Крессманом и Китченером [50]

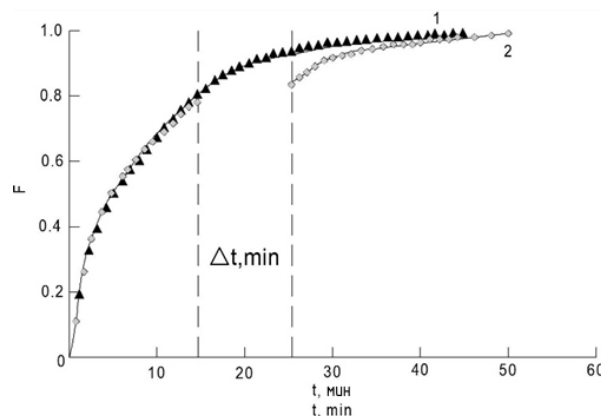


Рисунок 7. Кинетические зависимости сорбции ионов аммония с учетом времени прерывания контакта ионита с раствором (1); без перерыва (2)

Figure 7. Kinetic dependences of the ammonium ion sorption taking into account the time of interruption of the ionite-solution contact (1); without interruption (2)

Как видно из рисунка 8 по истечении некоторого времени («отдыха» ионита, 10 мин) и возобновления контактирования раствора с волокном скорость ионообменного процесса в начальный момент увеличивается. Это также свидетельствует о гелевой кинетике сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1.

Для расчета коэффициента внутренней диффузии (D , m^2/c) для волокна ВИОН КН-1 применили уравнение:

$$D = \frac{B \cdot r^2}{\pi^2} \quad (5)$$

где r – радиус хемосорбционного волокна, м ($r_{\text{ПАН}} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ м}$); B – тангенс угла наклона прямой зависимости $Bt = f(t)$, где $Bt = (F/1.08)^2$.

Время полусорбции $t_{1/2}$, опосредовано характеризующее скорость сорбции, вычисляли по уравнению:

$$1/2 = 3 \cdot r^2 D \cdot 6 \quad (6)$$

Кинетические параметры процесса сорбции ионов аммония сорбентом ВИОН КН-1 представлены в таблице 5. Как видно из таблицы с увеличением концентрации уменьшается время полусорбции и увеличивается коэффициент внутренней диффузии.

В работе проведено исследование сорбции в динамических условиях. Для нахождения оптимальной высоты волокна в динамическом режиме были получены выходные кривые сорбции ионов аммония (рисунок 9).

Таблица 5.

Кинетические параметры сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1

Table 5.

Kinetic parameters of the process of ammonium ion sorption by VION KN-1 fiber

$C_{\text{NH}_4^+}$, ммоль/дм ³ mmol/dm ³	$B \times 10^4$	$D \times 10^{15}$, м ² /с m ² /s	$\tau_{1/2}$, мин min
11,3	19	23,31	2,59
7,56	16	12,27	4,59
4,72	8	9,81	6,17
1,78	7	8,59	7,30

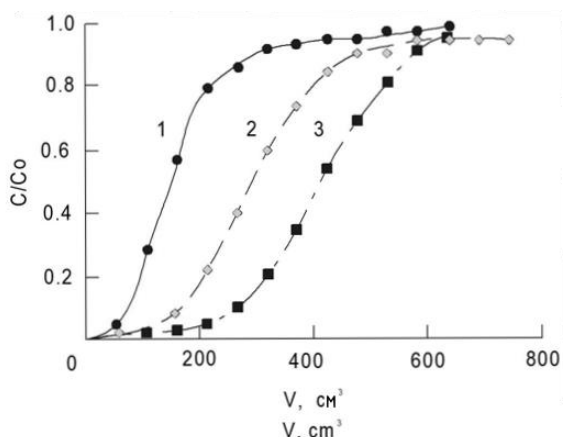


Рисунок 8. Выходные кривые сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1. Концентрация раствора 11,3 ммоль/дм³, скорость пропускания раствора 3 см³/мин
Figure 8. Output curves of the ammonium ion sorption by VION KN-1 fiber. The solution concentration is 11.3 mmol/dm³; the solution flow rate is 3 cm³/min

Полная динамическая обменная емкость (ПДОЕ) по отношению к ионами аммония для волокна ВИОН КН-1 составляет $\approx 4,3$ ммоль/г. Для определения эффективности степени извлечения построены и проанализированы кривые зависимости степени извлечения от массы навески волокна и объема раствора (рисунок 10). Как видно, из рисунка 12 с увеличением массы навески увеличивается степень извлечения ионов аммония. Так при пропускании 200 см³ раствора с концентрацией 11,3 ммоль/дм³ через слой волокна ВИОН КН-1 массой 0,93 г. можно достичь степени извлечения больше 96 %.

Для оценки влияния концентрации исходного раствора на вид выходных кривых получены и проанализированы зависимости относительной концентрации C/C_0 от объема вытекающего раствора и от концентрации (рисунок 11).

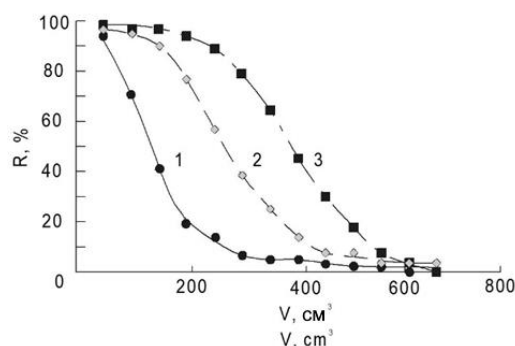


Рисунок 9. Кривые зависимости степени извлечения от концентрации и от объема пропущенного раствора (1 – $m = 0,31$ г., $h = 0,5$ см; 2 – $m = 0,62$ г., $h = 1,0$ см; 3 – $m = 0,93$ г., $h = 1,5$ см)

Figure 9. Curves of the dependence of the degree of recovery on the height of the layer (weight of the sample) and the volume of the passed solution (1 – $m = 0,31$ g, $h = 0,5$ cm; 2 – $m = 0,62$ g, $h = 1,0$ cm; 3 – $m = 0,93$ g, $h = 1,5$ cm)

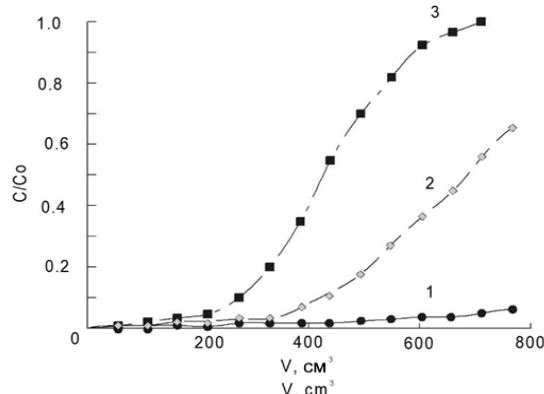


Рисунок 10. Выходные кривые сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1 с разными концентрация раствора. Скорость пропускания раствора 3 см³/мин (1 – 3,34 ммоль/дм³; 2 – 7,10 ммоль/дм³; 3 – 10,00 ммоль/дм³)

Figure 10. Output curves of ammonium ion sorption by the fiber VION KN-1 with different solution concentrations. The solution flow rate is 3 cm³/min (1 – 3,34 mmol/dm³; 2 – 7,10 mmol/dm³; 3 – 10,00 mmol/dm³)

Как видно из рисунка 12 при самой наименьшей концентрации ионов аммония в исходном растворе (3,34 ммоль/дм³) относительные концентрации для ВИОН КН-1 составляют меньше 0,065. Это свидетельствует о том, что с уменьшением концентрации в динамическом режиме сорбционные характеристики волокон не уменьшаются, что делает их использование целесообразным при очистке разбавленных растворов, содержащих ионы аммония.

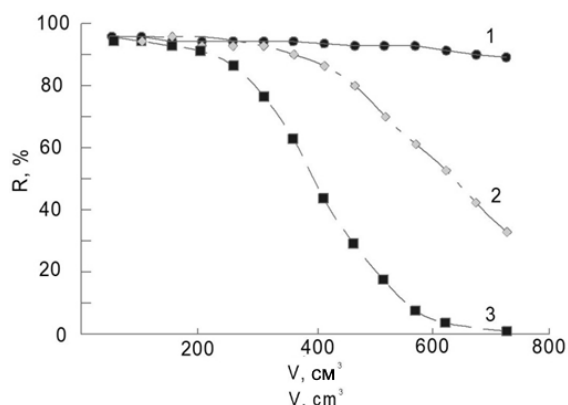


Рисунок 11. Кривые зависимости степени извлечения от концентрации и от объема пропущенного раствора (1 – 3,34 ммоль/дм³; 2 – 7,10 ммоль/дм³; 3 – 10,00 ммоль/дм³)

Figure 11. The curves of the dependence of the degree of recovery on concentration and on the volume of the passed solution (1 – 3.34 mmol/dm³; 2 – 7.10 mmol/dm³; 3 – 10.00 mmol/dm³)

Доказательство этих высказываний можно увидеть на рисунке 12. Как видно из рисунка 12 при пропускании раствора объемом 700 см³ через слой ВИОН КН-1 (т. волокна = 0,93 г.) при малых концентрациях ионов аммония в исходном растворе степень извлечения составляет больше 93.

Прогнозирование степени извлечения ионов аммония из сточных вод проводилось с применением автоматизированной нейронной сети STATISTICA. Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 6.

Таблица 6. Параметры процесса сорбции

Table 6. Parameters of the sorption process

Фактор Factor	C, моль/дм ³ mol/dm ³	V, дм ³ dm ³	m, г g
Уровни варьирования фактора Factor variation levels	0,002 0,007 0,012	0,05 0,35 0,65	0,31 0,65 0,93
Интервал варьирования Variation interval	0,005	0,300	0,310

Проводили серию экспериментов таким образом, чтобы каждый фактор перекликался с другими факторами. Значения входных факторов (концентрация ионов аммония, объем пропущенного раствора через слой сорбента и масса навески волокна) и соответствующий выходной параметр (степень извлечения ионов аммония) заносили в таблицу и использовали для обучения искусственной нейронной сети программы STATISTICA 12 с модулем STATISTICA Automated Neural Networks (SANN).

Для определения зависимости выходной переменной от значения входных переменных выбрали регрессионный анализ. Полученные высокие коэффициенты детерминации для обучающей, тестовой и контрольной выборок, характеризуют высокую производительность обученной сети. Ошибка обучения составила 0,279647 для ВИОН КН-1. Функция активации скрытых нейронов тождественная, а выходных нейронов была логистическая. Сохранили лучшую полученную сеть в формате PMML с целью дальнейшего использования для автоматического построения прогноза степени извлечения ионов волокнистым сорбентом ВИОН КН-1.

Адекватность обученной нейронной сети для волокнистого сорбента проверяли графическим методом, построили диаграмму рассеивания целевых и выходных значений нейронной сети. Из диаграммы видно, что все выходные значения для ВИОН КН-1 находятся на прямой линии под углом 45°, т. е. они совпадают с целевыми значениями (рисунок 13).

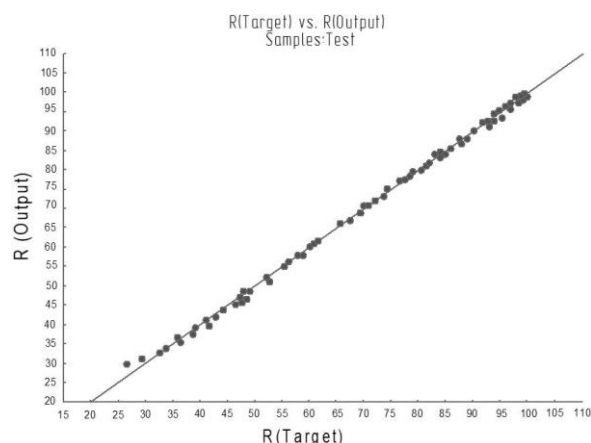


Рисунок 12. Зависимость целевых значений степени извлечения ионов аммония от выходных значений

Figure 12. The dependence of the target values of the degree of recovery of ammonium ions on the output values

Для определения области значений факторов (входных переменных), в которой степень извлечения ионов аммония волокнистым сорбентом имеет максимальное значение использовали графики поверхности отклика. График поверхности

отклика представляет собой изображения в трехмерном пространстве, представляющая отклик одной переменной (степень извлечения) в зависимости от двух входных переменных при постоянности остальных факторов. Исследовали зависимость степени извлечения от концентрации ионов аммония и от объема пропускаемого раствора (рисунок 14).

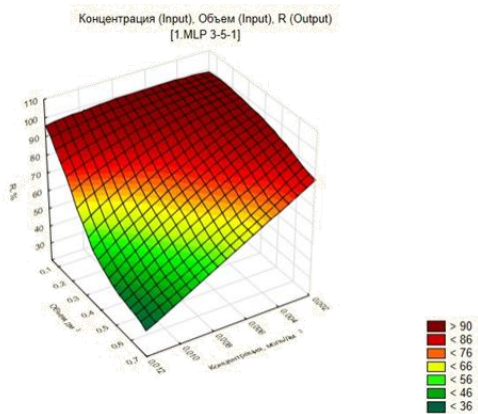


Рисунок 13. Поверхность отклика выходного параметра в зависимости от концентрации загрязнителя и объема протекающего раствора

Figure 13. The response surface of the output parameter depending on the pollutant concentration and the volume of the flowing solution

При увеличении концентрации ионов аммония и объема пропускаемого раствора для волокнистого сорбента уменьшается степень извлечения. В процессе, где применяется волокно ВИОН КН-1 степени извлечения больше 90 % можно достичь при пропуске 0,2 дм³ раствора с концентрациями от 0,002 до 0,012 моль/дм³. Также показателя больше 90 % можно достичь при концентрации 0,002 моль/дм³ с пропуском 0,6 дм³ раствора).

Аналогичные поверхности отклика получили для зависимости степени извлечения от концентрации ионов аммония и от массы навески волокна, а также от массы навески волокна и от объема пропускаемого раствора

Установлено, что с уменьшением концентрации и увеличением массы волокна увеличивается степень извлечения аммонийного азота и с увеличением объема пропускаемого раствора и уменьшением массы навески сорбента снижается степень извлечения ионов аммония.

Для прогноза степени извлечения ионов аммония волокнистым сорбентом, ранее сохраненную в формате PMML модель с идентификатором сети запустили на новые данные. Новые данные представляют собой результаты экспериментов, которые ранее не были включены в таблицу для обучения нейронных сетей. Массив данных ионообменного волокна включает 7 опытов (таблица 7).

Таблица 7. Массив новых данных по извлечению ионов аммония волокном ВИОН КН-1

Table 7. An array of new data on the extraction of ammonium ions with the VION KN-1 fiber

Концентрация, моль/дм ³ Concentration, mol/dm ³	Объем, дм ³ Volume, dm ³	Масса, г Mass, g	R, %
0,010000000	0,2	0,3136	57,20000
0,011595400	0,15	0,6272	91,37589
0,006067389	0,45	0,6272	77,66356
0,001995262	0,7	0,629	95,71635
0,007096173	0,65	0,9411	83,81542
0,001931901	0,35	0,3113	89,10855
0,007840674	0,5	0,4545	60,49453

После занесения новых данных в электронную таблицу программы и запуска модели с идентификатором сети вычислили абсолютные и квадратные остатки (среднеквадратичные ошибки) (таблица 8).

Таблица 8. Предсказанные значения степени извлечения ионов аммония волокном ВИОН КН-1 нейронной сетью MLP 3–5–1

Table 8. Predicted values of the degree of extraction of ammonium ions by the VION KN-1 fiber by the neural network MLP 3–5–1

Набл. Номер Obs. Number	R Целевая Target	R-Выход Exit	R-Абс. Ост. Abs. Rest	R-Квадраты Ост. Squares Abs.
1	57,20000	57,20866	0,008663	0,000075
2	91,37589	91,39071	0,014817	0,000220
3	77,66356	77,34208	0,321479	0,103348
4	95,71635	95,62773	0,088623	0,007854
5	83,81542	83,89240	0,076987	0,005927
6	89,10855	89,79660	0,688049	0,473411
7	60,49453	60,89747	0,402934	0,162356

В таблице 8 в колонке «R Целевая» представлены данные, полученные в ходе проведения процесса сорбции в лабораторных условиях, в колонке «R–Выход» – предсказанные значения выходного параметра. Эти значения выдала обученная нейронная сеть MLP 3–5–1. При сравнении первой и второй колонки рассчитаны значения абсолютного отклонения. Абсолютное отклонение по всей выборке не превышает 0,688049, колонка «R–Абс. Ост.». Среднеквадратическая ошибка тестовой выборки при извлечении ионов аммония ионообменным волокном ВИОН КН-1 составляет 0,596459226. Маленькое значение среднеквадратичной ошибки на введенных новых данных свидетельствует о хорошем качестве построенной модели для волокнистого сорбента. Нейронные сети могут быть использованы для прогноза степени извлечения ионов аммония волокнистым сорбентом ВИОН КН-1.

Заключение

Проведенная оценка кинетических характеристик сорбции ионов аммония волокном ВИОН КН-1 показала, что поглощение волокнистым сорбентом указанных катионов характеризуется высокой скоростью. Уменьшение концентрации внешнего раствора приводит сокращению времени достижения равновесного состояния и величины сорбционной емкости. Экспериментальные данные, полученные в результате

исследования кинетики сорбции ионов аммония карбоксильным волокнистым сорбентом в статических условиях, и проведенные расчеты, позволили установить факт аппроксимации уравнений кинетики, справедливых для случая внутренней диффузии. Экспериментальные данные по сорбции были проверены с помощью изотерм Фрейндлиха и Ленгмюра. Уравнение Ленгмюра лучше описывает процесс сорбции катионов аммония на волокнистом сорбенте ВИОН КН-1.

Литература

- 1 Дюжева Н.В., Тинькова А.А. Анализ конъюнктуры мирового рынка минеральных удобрений // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Экономика. 2020. № 1. С. 91–100. doi: 10.24143/2073-5537-2020-1-91-100
- 2 Илькив Н. Российский рынок минеральных удобрений // Агрофорум. 2021. № 7. С. 44–48.
- 3 Глушанкова И., Бессонова Е., Рудакова Л., Власова О. и др. Очистка сточных вод производства минеральных фторсодержащих солей от ионов аммония // Экология и промышленность России. 2015. № 19. С. 16–19. doi: 10.18412/1816-0395-2015-7-16-19
- 4 Cruz H., Gabon M.Y., Salehin S., Seviour T. et. al. Magnetic poly(acrylic acid) – based hydrogels for rapid ammonium sorption and efficient sorbent separation from sewage // *Environmental Science and Ecotechnology*. 2021. V.6. P. 100097. doi: 10.1016/j.ese.2021.100097
- 5 Pinelli D., Foglia A., Fatone F., Papa E. et. al. Ammonium recovery from municipal wastewater by ion exchange: Development and application of a procedure for sorbent selection // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. V. 10. №. 6. P. 108829. doi: 10.1016/j.jece.2022.108829.
- 6 Shakoor M.B., Ye Zh., Chen Sh. Engineered biochars for recovering phosphate and ammonium from wastewater: A review // *Science of The Total Environment*. 2021. V. 779. P. 146240. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146240
- 7 Bhatt P., Joshi S., Bayram G.M.U., Khatri P. Developments and application of chitosan-based adsorbents for wastewater treatments // *Environmental Research*. 2023. P. 115530. doi: 10.1016/j.envres.2023.115530
- 8 Перегудов и др. Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 3. С. 347–359. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3468
- 9 Shunkevich A.A., Akulich Z.I., Mediak G.V., Soldatov V.S. Acid–base properties of ion exchangers. III. Anion exchangers on the basis of polyacrylonitrile fiber // *Reactive and Functional Polymers*. 2005. V. 63(1). P. 27–34. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2005.02.002
- 10 Lee C.–G., Alvarez P.J.J., Nam A., Park S.–J. et. al. Arsenic(V) removal using an amine-doped acrylic ion exchange fiber: Kinetic, equilibrium, and regeneration studies // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. V. 325. P. 223–229. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.003
- 11 Перегудов Ю.С., Тимкова А.В., Горбунова Е.М., Плотникова С.Е. Применение ионообменного волокна на стадии доочистки сточных вод гальванического производства // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 330–336. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-330-336
- 12 Cheng Y., He P., Dong F., Nie X. et.al. Polyamine and amidoxime groups modified bifunctional polyacrylonitrile-based ion exchange fibers for highly efficient extraction of U(VI) from real uranium mine water // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 367. P. 198–207. doi: 10.1016/j.cej.2019.02.149
- 13 Kopylova V.D., Zverev O.V., Astapov A.V., Peregudov Yu. S. Thermokinetics of sorption of Zn(II) by VION KN-1 carboxyl-containing fibre // *Fibre Chemistry*. 2006. V. 38. P. 151–154. doi: 10.1007/s10692 – 006-0061-9
- 14 Xu W., Zheng W., Wang F., Xiong, Q. et.al. Using iron ion-loaded aminated polyacrylonitrile fiber to efficiently remove wastewater phosphate // *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 403(1). P. 1–11. doi: 10.1016/j.cej.2020.126349
- 15 Грачек В.И., Шункевич А.А., Поликарпов А.П. Исакович О.И. Сорбционные свойства нового волокнистого хелатного ионита // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*. 2020. V. 56. № 2. P. 206–211. doi: 10.29235/1561-8331-2020-56-2-206-211
- 16 Wang F., Wang X., Jiang Yu., Ni Zh. et al. Study of adsorption performance and adsorption mechanism for U (VI) ion on modified polyacrylonitrile fibers // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2020. V. 323. № 7. P. 365–377. doi: 10.1007/s10967-019 – 06928-5
- 17 Perepelkin K.E. Structure and structural mechanics of polymer fibres: current concepts // *Chemistry and technology of chemical fibres*. 2009. V. 41. P. 9–21.
- 18 Селеменев В.Ф., Славинская Г.В., Хохлов В.Ю. и др. Практикум по ионному обмену. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 2004. 160 с.
- 19 Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. Машинное обучение. СПб.: Питер, 2017. 336 с.
- 20 Han H.–G., Chen Q., Qiao J.–F. An efficient self-organizing RBF neural network for water quality prediction // *Neural Networks*. 2011. V. 24(7). P. 717–725. doi: 10.1016/j.neunet.2011.04.006

21 Heddham S., Bermad A., Dechemi N. Applications of Radial-Basis Function and Generalized Regression Neural Networks for Modeling of Coagulant Dosage in a Drinking Water-Treatment Plant: Comparative Study // Journal of Environmental Engineering. 2011. V. 137 (12). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000435

22 Jayaweera C.D., Aziz N. Development of Extreme Learning Machine Radial Basis Function Neural Network Models to Predict Residual Aluminum for Water Treatment Plants // Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC). 2018. P. 835-848. doi: 10.1007/978-3-030-02686-8_62

References

1 Dyuzheva N.V., Tinkova A.A. Analysis of the conjuncture of the world market of mineral fertilizers. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics. 2020. no. 1. pp. 91-100. doi: 10.24143/2073-5537-2020-1-91-100 (in Russian).

2 Ilkiv N. The Russian market of mineral fertilizers. Agroforum. 2021. no. 7. pp. 44-48. (in Russian).

3 Glushankova I., Bessonova E., Rudakova L., Vlasova O., etc. Wastewater treatment of the production of mineral fluorinated salts from ammonium ions. Ecology and industry of Russia. 2015. no. 19. pp. 16-19. doi: 10.18412/1816-0395-2015-7-16-19 (in Russian).

4 Cruz H., Gabon M.Y., Salehin S., Seviour T. et. al. Magnetic poly(acrylic acid) – based hydrogels for rapid ammonium sorption and efficient sorbent separation from sewage. Environmental Science and Ecotechnology. 2021. vol. 6. pp. 100097. doi: 10.1016/j.ese.2021.100097

5 Pinelli D., Foglia A., Fatone F., Papa E. et. al. Ammonium recovery from municipal wastewater by ion exchange: Development and application of a procedure for sorbent selection. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. vol. 10. no. 6. pp. 108829. doi: 10.1016/j.jece.2022.108829.

6 Shakoor M.B., Ye Zh., Chen Sh. Engineered biochars for recovering phosphate and ammonium from wastewater: A review. Science of The Total Environment. 2021. vol. 779. pp. 146240. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146240

7 Bhatt P., Joshi S., Bayram G.M.U., Khati P. Developments and application of chitosan-based adsorbents for wastewater treatments. Environmental Research. 2023. pp. 115530. doi: 10.1016/j.envres.2023.115530

8 Peregudov et al. Sorption and chromatographic processes. 2021. vol. 21. no. 3. pp. 347-359. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3468 (in Russian).

9 Shunkevich A.A., Akulich Z.I., Mediak G.V., Soldatov V.S. Acid-base properties of ion exchangers. III. Anion exchangers on the basis of polyacrylonitrile fiber. Reactive and Functional Polymers. 2005. vol. 63(1). pp. 27-34. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2005.02.002

10 Lee C.-G., Alvarez P.J.J., Nam A., Park S.-J. et. al. Arsenic(V) removal using an amine-doped acrylic ion exchange fiber: Kinetic, equilibrium, and regeneration studies. Journal of Hazardous Materials. 2017. vol. 325. pp. 223-229. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.003

11 Peregudov Yu.S., Timakova A.V., Gorbunova E.M., Plotnikova S.E. Application of ion-exchange fiber at the stage of post-treatment of wastewater of galvanic production. Bulletin of VSUIT. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 330-336. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-330-336 (in Russian).

12 Cheng Y., He P., Dong F., Nie X. et.al. Polyamine and amidoxime groups modified bifunctional polyacrylonitrile-based ion exchange fibers for highly efficient extraction of U(VI) from real uranium mine water. Chemical Engineering Journal. 2019. vol. 367. pp. 198-207. doi: 10.1016/j.cej.2019.02.149

13 Kopylova V.D., Zverev O.V., Astapov A.V., Peregudov Yu. S. Thermokinetics of sorption of Zn(II) by VION KN 1 carboxyl-containing fibre. Fibre Chemistry. 2006. vol. 38. pp. 151-154. doi: 10.1007/s10692-006-0061-9

14 Xu W., Zheng W., Wang F., Xiong, Q. et.al. Using iron ion-loaded aminated polyacrylonitrile fiber to efficiently remove wastewater phosphate. Chemical Engineering Journal. 2021. vol. 403(1). pp. 1-11. doi: 10.1016/j.cej.2020.126349

15 Grachek V.I., Shunkevich A.A., Polikarpov A.P. Isakovich O.I. Sorption properties of a new fibrous chelated ionite. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series. 2020. vol. 56. no. 2. pp. 206-211. doi: 10.29235/1561-8331-2020-56-2-206-211 (in Russian).

16 Wang F., Wang X., Jiang Yu., Ni Zh. et al. Study of adsorption performance and adsorption mechanism for U (VI) ion on modified polyacrylonitrile fibers. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. vol. 323. no. 7. pp. 365-377. doi: 10.1007/s10967-019-06928-5

17 Perepelkin K.E. Structure and structural mechanics of polymer fibres: current concepts. Chemistry and technology of chemical fibres. 2009. vol. 41. pp. 9-21.

18 Selemenev V.F., Slavinskaya G.V., Khokhlov V.Yu., etc. Workshop on ion exchange. Voronezh, Voronezh University Press, 2004. 160 p. (in Russian).

19 Brink H., Richards D., Feverolf M. Machine learning. St. Petersburg, Peter, 2017. 336 p. (in Russian).


20 Han H.-G., Chen Q., Qiao J.-F. An efficient self-organizing RBF neural network for water quality prediction. Neural Networks. 2011. vol. 24(7). pp. 717-725. doi: 10.1016/j.neunet.2011.04.006

21 Heddham S., Bermad A., Dechemi N. Applications of Radial-Basis Function and Generalized Regression Neural Networks for Modeling of Coagulant Dosage in a Drinking Water-Treatment Plant: Comparative Study. Journal of Environmental Engineering. 2011. vol. 137 (12). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000435


22 Jayaweera C.D., Aziz N. Development of Extreme Learning Machine Radial Basis Function Neural Network Models to Predict Residual Aluminum for Water Treatment Plants. Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC). 2018. pp. 835-848. doi: 10.1007/978-3-030-02686-8_62

Сведения об авторах


Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>


Елена М. Горбунова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>


Анна В. Тимкова аспирант, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, timkova.anna@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0630-2993>

Ксения Б. Ким к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kmkseniya@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

Владимир Н. Данилов к.х.н., доцент, кафедра естественных дисциплин, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, v_dan62@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7106-6638>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Sabukhi I. Niftaliev Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>


Elena M. Gorbunova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, av. Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>


Anna V. Timkova graduate student, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, av. Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, timkova.anna@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0630-2993>

Kseniya B. Kim Cand. Sci. (Chem.), associate professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, av. Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, kmkseniya@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

Vladimir N. Danilov Cand. Sci. (Chem.), associate professor, natural disciplines department, Voronezh State University of Engineering Technologies, av. Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, v_dan62@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7106-6638>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 27/12/2022	После редакции 30/01/2023	Принята в печать 28/02/2023
Received 27/12/2022	Accepted in revised 30/01/2023	Accepted 28/02/2023