
**ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
WATER SUPPLY, SEWER SYSTEM, CONSTRUCTION SYSTEMS
OF PROTECTION OF WATER RECOURCES (TECHNICAL)**

УДК 66.011:66.023

**ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕДИ В ОДНОСЕКЦИОННОМ АППАРАТЕ
КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ КАТИОНИТА**

С. В. НАТАРЕЕВ^{1,2}, А. И. ЛАРИНА¹ Т. В. ФРОЛОВА²

¹ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: natoret@mail.ru

Разработано математическое описание процесса очистки воды от ионов тяжелых металлов методом ионного обмена в коническом аппарате со взвешенным слоем катионита. При разработке математического описания использованы следующие допущения: ионит монодисперсен и имеет сферическую форму; начальное распределение веществ в ионите равномерное; равновесие процесса описывается уравнением изотермы адсорбции Ленгмюра; скорость процесса лимитируется как внутренней, так и внешней диффузией; ионит в аппарате движется с продольным перемешиванием. В соответствии с принятыми допущениями сформулировано математическое описание процесса, включающее уравнение материального баланса раствора, уравнение изотермы адсорбции, уравнение кинетики диффузии, начальные и граничные условия. Для проверки адекватности разработанной модели реальному процессу проведены экспериментальные исследования процессов ионообменной сорбции ионов меди на сульфокатионите КУ-2-8 в лабораторном коническом аппарате со взвешенным слоем. В ходе исследований были сняты выходные кривые ионного обмена. Сравнение результатов расчета и эксперимента позволило сделать вывод об адекватности разработанного математического описания реальному процессу. Расхождение расчета и эксперимента не превышает 15 %. Даны рекомендации по использованию полученных зависимостей для практического применения.

Ключевые слова: ионный обмен, аппарат с псевдооживленным слоем ионита, математическая модель, водоснабжение.

**WATER PURIFICATION FROM COPPER IONS IN A SINGLE-SECTION
CONICAL APPARATUS WITH A FLUIDISED BED OF CATIONITE**

S. V. NATAREEV^{1,2}, A. I. LARINA¹, T. V. FROLOVA¹

¹Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Russian Federation, Ivanovo

²Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: natoret@mail.ru

The mathematical description of the process of solution purification from heavy metal ions by means of ion exchange in a conical shaped apparatus with suspended layer was developed. At the developing mathematical description the following assumptions were used: the ionite is monodisperse and has a spherical shape; uniform initial distribution of substances in the ionite; the process equilibrium is described by the Langmuir adsorption isotherm equation; the velocity of the process is limited by both internal and external diffusion; the ionite in the device moves with longitudinal mixing effect. In accordance with the accepted assumptions,

a mathematical description of the process is formulated, including the material balance equations for a solution, the equation of the adsorption isotherm, the equation of diffusion kinetics, as well as the initial and boundary conditions. To test the adequacy of the developed model to the real process, experimental studies of processes of ion-exchange sorption of copper ions on the KY-2-8 sulfonic acid cation exchanger in a laboratory conical shaped apparatus with suspended layer. During the research, curves of output ion exchange curves were taken. Comparison of the results of calculation and experiment made it possible to conclude that the developed mathematical description is adequate to the real process. The discrepancy between the calculation and the experiment does not exceed 15 %. Recommendations are given on the application of the obtained dependences for practical application.

Key words: ion exchange, fluidized bed apparatus, mathematical model, water supply.

В чрезвычайных ситуациях вода является первоочередным компонентом жизнеобеспечения человека¹. Для снабжения пострадавшего населения и спасателей водой используются мобильные водоочистные станции, которые могут быть развернуты в короткие сроки [1]. В состав мобильных станций входит ионообменное оборудование, предназначенное для очистки воды от ионов тяжелых металлов. При этом очищенная вода удовлетворяет нормативным требованиям предельно допустимых концентраций и может быть пригодна для технических нужд и употребления в пищу² [2]. Для очистки воды успешно применяются аппараты с неподвижным и псевдооживленным (кипящим) слоем ионита. Каждые из них имеют определенные достоинства и недостатки [3, 4]. В настоящей работе приведены результаты исследования процессов ионного обмена в односекционном аппарате периодического действия с псевдооживленным слоем. К достоинствам данной конструкции аппарата можно отнести незначительное гидравлическое сопротивление слоя, возможность очистки мутных растворов, практически полное выравнивание концентрации раствора в рабочем объеме аппарата, развитая поверхность контакта между частицами ионита и очищаемой водой, обеспечивающая высокую скорость массообмена в жидкой фазе, простота устройства аппарата и отсутствие в нем подвижных частей и механизмов. К недостаткам в работе аппарата можно отнести ограниченный диапазон скоростей сжижающего агента, истирание и унос частиц сорбента. Кроме того, в ионообменных аппаратах непрерывного действия наблюдается значительная неравномерность отработки ионита, поскольку время пребывания отдельных частиц ионита существенно отличается от его среднего значения. Поэтому в ряде случаев аппараты с

псевдооживленным слоем не могут заменить аппараты с неподвижным слоем ионита [5, 6]. Повышение эффективности их работы является актуальной задачей.

Целью работы является совершенствование режима работы ионообменного аппарата с псевдооживленным слоем ионита для проведения процесса очистки воды от ионов меди. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследований: 1) разработка математического описания ионного обмена в аппарате с псевдооживленным слоем ионита с учетом современных представлений о равновесии и кинетики процесса, а также гидродинамических особенностей движения раствора и ионита в аппарате; 2) проведение экспериментального исследования процесса ионообменной сорбции в аппарате с псевдооживленным слоем ионита; 3) проверка адекватности разработанной математической модели; 4) разработка рекомендаций для практического применения.

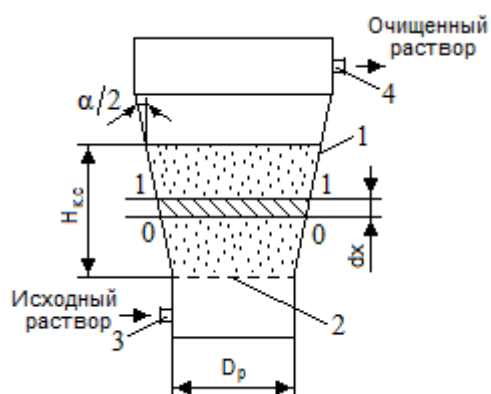
В псевдооживленном слое отрицательное влияние оказывает продольное перемешивание раствора и ионита, которое снижает скорость ионного обмена за счет уменьшения средней движущей силы процесса. Для снижения продольного перемешивания применяют различного рода насадки, секционирование взвешенного слоя горизонтальными тарелками и коническую форму корпуса адсорбера. Когановским А. М. с соавторами [7] отмечено, что применение провальных решеток ослабляет эффект продольного перемешивания частиц ионита, но не устраняет их полностью. При этом наблюдается снижение динамической обменной емкости сорбента до проскока, значение которой зависит от относительного расширения слоя, рассчитываемого как отношение высоты взвешенного слоя к высоте плотного слоя

¹ ГОСТ 22.3.01-2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Первоочередное жизнеобеспечение пострадавшего населения. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации. 2023. 19 с.

² Методические рекомендации по организации первоочередного жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях и работы пунктов временного размещения пострадавшего населения (утв. МЧС России 20.08.2020 № 2-4-71-18-11). Электронный ресурс. Доступ из СПС КонсультантПлюс. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365189/.

ионита. Исследования, проведенные в работе [8] показали, что степень очистки раствора от ионов двухвалентных металлов в ступенчато-противоточном аппарате в 2–3 раза выше, чем однокамерном аппарате кипящего слоя.

Уменьшение вредного влияния продольного перемешивания может быть достигнуто в ионообменных аппаратах конической формы с расширяющимся сверху сечением. При такой форме аппарата снижается скорость раствора по мере его подъема, что позволяет проводить процесс ионообмена с полидисперсным ионитом. При этом уменьшается унос мелкой фракции ионита и достигается более организованная циркуляция твердой фазы, которая поднимается в центре и опускается у стенок аппарата. Это приводит к повышению



Аппарат работает следующим образом. Исходный раствор поступает в аппарат через штуцер 3, равномерно распределяется по всей площади поперечного сечения аппарата с помощью водораспределительной решетки 2, проходит через отверстия решетки и кипящий слой ионита, где очищается от ионов целевого компонента. Очищенный раствор отделяется от частиц твердой фазы в сепарационном пространстве и выводится из аппарата через штуцер 4. Обозначим $H_{к.с}$ – высота кипящего слоя ионита, м; D_p – диаметр водораспределительной решетки, м; α – угол раскрытия конуса, град.

При построении математической модели учтем следующие основные факторы процесса ионного обмена: равновесное состояние

равномерного насыщения ионита целевым компонентом и позволяет снизить высоту ионообменной камеры. В работе [9] отмечено, что аппараты с коническим кипящим слоем по своим показателям схожи с аппаратами с неподвижным слоем ионита.

Для повышения эффективности процесса ионного обмена в аппарате целесообразно применение метода математического моделирования, позволяющего оценить влияние различных факторов и явлений, а также найти рациональные режимы его работы. В работе предложено математическое описание процесса ионного обмена в односекционном аппарате периодического действия конической формы с кипящим слоем сорбента, схема которого показана на рис. 1.

Рис. 1. Односекционный ионообменный аппарат периодического действия конической формы с кипящим слоем сорбента:
1 – корпус; 2 – водораспределительная решетка; 3, 4 – штуцера для ввода и вывода раствора соответственно

в системе ионит-раствор описывается уравнением Ленгмюра; перенос противоионов из жидкой фазы в твердую фазу ионита осуществляется в смешанно-диффузионной области; изменение концентрации сорбируемого вещества в жидкой фазе происходит по высоте кипящего слоя ионита за счет движения раствора с переменной по сечению аппарата скоростью перемешивания жидкости в продольном направлении и процесса ионного обмена.

В соответствии с принятыми допущениями динамика процесса ионного обмена будет описываться системой следующих уравнений:

– уравнение материального баланса в потоке раствора по высоте кипящего слоя ионита:

$$\varepsilon_{к.с} \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon_{к.с}) \frac{\partial \bar{C}_{ср}}{\partial \tau} + \frac{v_{вх} R_1^2 - 2\varepsilon_{к.с} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} D_x \left(R_1 + x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)}{\left(R_1 + x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2} \frac{\partial C}{\partial x} = \varepsilon_{к.с} D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \quad (1)$$

– уравнение диффузии сорбируемого вещества в твердую фазу ионита:

$$\bar{D} \left[\frac{\partial^2 \bar{C}(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial r} \right] = \frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial \tau} \quad (2)$$

($\tau > 0$; $0 \leq r \leq r_0$);

– уравнение изотермы адсорбции:

$$\bar{C}_p = a_0 \frac{kC_p}{1 + kC_p}, \quad (3)$$

– уравнение для определения средней концентрации целевого компонента в сферической частице ионита:

$$\bar{C}_{cp}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(r, \tau) dr; \quad (4)$$

– условия однозначности:

$$C(0) = C_0; \quad (5)$$

$$\bar{C}_{cp}(0) = \bar{C}(r, 0) = \bar{C}_{cp,0}; \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \bar{C}(0, \tau) \neq \infty; \quad (7)$$

$$\bar{D} \left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \beta [C - C_p(\bar{C}_p)], \quad (8)$$

$$v_{\text{вх}} C_{\text{вх}} = v_{\text{вх}} C(x, \tau)_{x=0} - \frac{\varepsilon_{\text{к.с}} D_x \left(R_1 + x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}{R_1^2} \Big|_{x=0} = \quad (9)$$

$$= \varepsilon_{\text{к.с}} D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2};$$

$$\left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right|_{x=H_{\text{в.с}}} = 0, \quad (10)$$

где a_0 — предельное значение адсорбции, кмоль-экв/м³; D_x — коэффициент продольного перемешивания раствора, м²/с; $\bar{D}$ — эффективный коэффициент внутренней диффузии, м²/с; v — скорость раствора, м/с; k — адсорбционный коэффициент, м³/кмоль-экв; r — координата по радиусу частицы ионита, м; r_0 — радиус частицы ионита, м; $R_1 = D_p/2$ —

радиус водораспределительной решетки, м; τ — время, с; β — коэффициент массоотдачи в растворе, м/с; $\varepsilon_{\text{в.с}}$ — порозность кипящего слоя; индексы: вх — входящий; ср — средний; 0 — начальный.

Приведенная математическая постановка задачи (1)–(10) отличается от известных [3, 9–11] учетом в материальном балансе (1) и граничном условии (9) изменения скорости движения раствора по высоте аппарата.

Порозность кипящего слоя $\varepsilon_{\text{в.с}}$ находили по формуле О. М. Тодеса [12]:

$$\varepsilon_{\text{в.с}} = \left(\frac{18 \operatorname{Re} + 0,36 \operatorname{Re}^2}{\operatorname{Ar}} \right)^{0,21}, \quad (11)$$

где $\operatorname{Re} = \frac{v d_3}{\nu_{\text{ж}}}$ — число Рейнольдса для зерна;

$\operatorname{Ar} = \frac{d_3 (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) g}{\nu_{\text{ж}}^2 \rho_{\text{ж}}}$ — число Архимеда;

d_3 — диаметр зерна ионита, м; $\nu_{\text{ж}}$ — коэффициент кинематической вязкости раствора, м²/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкой фазы, кг/м³; $\rho_{\text{т}}$ — плотность твердой фазы, кг/м³.

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе β находили по уравнению [13]:

$$\operatorname{Nu} = 2,0 + 1,5 (\operatorname{Pr})^{0,33} [(1 - \varepsilon_{\text{к.с}}) \operatorname{Re}]^{0,5}, \quad (12)$$

где $\operatorname{Pr} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D}$ — число Прандтля;

$\operatorname{Re} = \frac{\operatorname{Ar} \varepsilon_{\text{к.с}}^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{\operatorname{Ar} \varepsilon_{\text{к.с}}^{4,75}}}$ — число Рейнольдса.

Коэффициент продольного перемешивания раствора рассчитывали по формуле [14]:

$$D_x = 0,57 v^{1,25}, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (13)$$

Решение краевой задачи (1)–(10) на ЭВМ осуществляли с помощью однородных консервативных разностных схем.

Для проверки соответствия разработанной математической модели реальному процессу были проведены экспериментальные исследования динамики ионного обмена в системе CuSO_4 — катионит КУ-2-8(На-форма) в односекционных ионообменных аппаратах конической формы. Аппараты были изготовлены из органического стекла высотой $H = 0,4$ м, диаметром водораспределительной решетки $D_p = 0,06$ м, углами раскрытия конуса $\alpha = 14$ и 20° . Опыты проводили при следующих условиях: расход раствора $Q = 10^{-5}$ м³/с;

концентрация раствора сульфата меди $C_{вх} = 0,01$ кмоль-экв/м³; объем единовременной загрузки катионита в аппарат $\bar{V} = 10^{-4}$ м³. Высота кипящего слоя $H_{к.с}$ в аппарате с углом раскрытия конуса 14° составляла 0,043 м, а 20° – 0,04 м.

При проведении опытов через аппарат пропускали исходный раствор и через 250 с отбирали на выходе из аппарата пробы очищенного раствора объемом 20 мл, в которых

определяли концентрацию ионов меди методом йодометрического титрования [15]. Экспериментальные выходные данные показаны на рис. 2.

Для проведения расчетов необходимо иметь уравнение изотермы адсорбции. Равновесие ионного обмена в системе $\text{CuSO}_4 - \text{КУ-2-8}(\text{Na-форма})$ изучали в статических условиях [16]. Результаты исследований показаны на рис. 3.

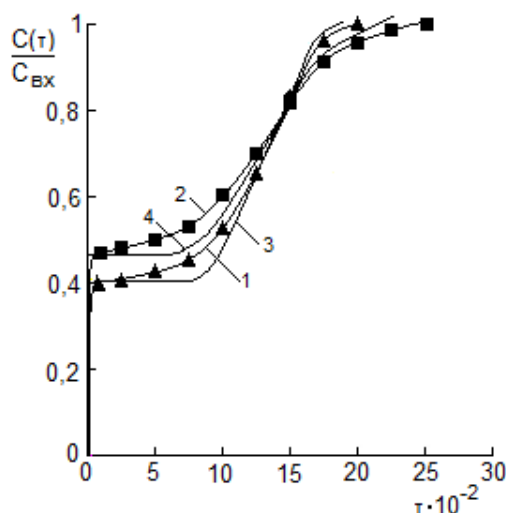


Рис. 2. Выходные кривые обмена $\text{Na}^+ - \text{Cu}^{2+}$ в аппаратах с углом раскрытия конуса 20° (1, 3) и 14° (2, 4):
1, 2 – экспериментальные кривые;
3, 4 – расчетные кривые

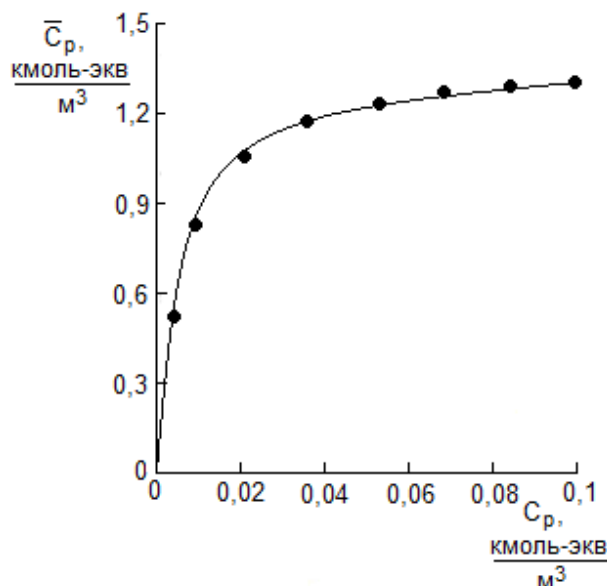


Рис. 3. Изотерма обмена $\text{Na}^+ - \text{Cu}^{2+}$ для сильноокислотного катионита

Экспериментальные данные равновесия ионного обмена обработаны в рамках модели Ленгмюра. Для определения параметров сорбции a_0 и k в уравнении (3) его преобразуем в линейную форму:

$$\frac{C_p}{\bar{C}_p} = \frac{C_p}{a_0} + \frac{1}{a_0 k}. \quad (12)$$

При обработке экспериментальных данных по уравнению (12) в координатах $(C_p / \bar{C}_p - C_p)$ методом наименьших квадратов получены значения $a_0 = 1,4$ кмоль-экв/м³ и $k = 150$ м³/кмоль-экв. Значение коэффициента корреляции составило 0,98.

На рис. 2 приведены в сравнении результаты математического моделирования и экспериментальные данные ионного обмена Na^+ - Cu^{2+} в аппаратах конической формы с кипящим слоем катионита КУ-2-8(На-форма). Расхождение не превышает 15 %.

В работе также были проведены экспериментальные исследования динамики ионного обмена Cu^{2+} - Na^+ в аппарате цилиндрической

формы с псевдоожиженным слоем катионита КУ-2-8(На-форма). Аппарат был изготовлен из органического стекла диаметром 0,06 м. Высота кипящего слоя $H_{\text{к.с}}$ в аппарате составляла 0,053 м. Условия проведения эксперимента были аналогичны опытам в аппаратах конической формы. Полученные выходные кривые приведены на рис. 4.

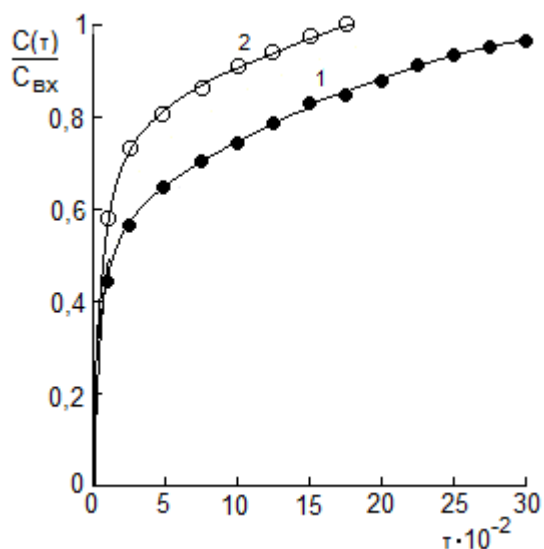


Рис. 4. Выходные кривые ионного обмена Cu^{2+} - Na^+ в аппарате цилиндрической формы с кипящим слоем катионита:
 $C_{\text{вх}}$, кмоль-экв/м³:
1 – 0,01; 2 – 0,05

Из анализа выходных кривых ионного обмена, представленных на рис. 4, следует, что режим работы аппарата цилиндрической формы приближается к режиму идеального вытеснения, для которого характерно максимальное значение средней скорости сорбции ионов меди в начале процесса и минимальное значение на последних стадиях ионообмена [17].

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет рассчитать с

приемлемой для инженерной практики погрешностью процесс ионного обмена в односекционном аппарате конической формы с кипящим слоем ионита. Применение такой конструкции аппарата для очистки растворов от ионов меди позволяет существенно снизить обратное перемешивание и повысить эффективность процесса ионного обмена по сравнению с аппаратом цилиндрической формы.

Список литературы

1. Гупалюк В. Ф., Баронин А. В., Работкина О. Е. Средства очистки воды в зонах чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1–2 (6). С. 191–196.
2. Водоподготовка: Справочник / Под ред. С. Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
3. Волжинский А. И., Константинов В. А. Регенерация ионитов. Теория процесса и расчет аппаратов. Л.: Химия, 1990. 240 с.
4. Emmanuel J. Zaganianis. Ion Exchange Resins and Adsorbents in Chemical Processing. Books on Demand Editions. 2016. 300 p.

5. Harlada C. E. Ion Exchange: theory and practice. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1994, 285 p.
6. Arup K. SenGupta. Ion Exchange in Environmental Processes: Fundamentals, Applications and Sustainable Technology. John Wiley & Sons, 2017, 497 p.
7. Очистка промышленных сточных вод / А. М. Когановский, Л. А. Кульский, Е. В. Сотникова [и др.]. Киев: Техніка, 1974. 257 с.
8. Натарева С. В., Ларина А. И., Фролова Т. В. Ионообменная очистка воды в аппарате со взвешенным слоем ионита // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 3 (52). С. 5–12.

9. Иониты в химической технологии. Под ред. Б. П. Никольского и П. Г. Романкова. Л.: Химия, 1982. 416 с.
10. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon press. 1975. 414 p.
11. Wei-Ming Ni. The Mathematics of Diffusion. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2011, 122 p.
12. Тодес О. М. Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1981. 296 с.
13. Рудобашта С. П. Массоперенос в системе с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
14. Смирнов Н. Н., Волжинский А. И., Константинов В. А. Расчет и моделирование ионообменных реакторов. Л.: Химия, 1984. 224 с.
15. Алексеев В. Н. Количественный анализ. Под ред. П. К. Агасяна. М.: Альянс. 2007. 504 с.
16. Практикум по ионному обмену: учебное пособие / В. Ф. Селеменев, Г. В. Славинская, В. Ю. Хохлов [и др.]. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. 160 с.
17. Натареев С. В., Бакин М. А., Снегирев Д. Г. Разработка математической модели ионообменной очистки воды от солей тяжелых металлов в емкостном аппарате // Пожарная и аварийная безопасность. 2021. № 1 (20). С. 27–31.
5. Harlada C. E. Ion Exchange: theory and practice. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1994, 285 p.
6. Arup K. SenGupta. Ion Exchange in Environmental Processes: Fundamentals, Applications and Sustainable Technology. John Wiley & Sons, 2017, 497 p.
7. *Očistka průmyslných stočných vod* [Industrial wastewater treatment] / A. M. Koganovskij, L. A. Kul'skij, E. V. Sotnikova [et al.]. Kiev: Tehnika, 1974, 257 p.
8. Natareev S. V., Larina A. I., Frolova T. V. Ionoobmennaya oчитка vody v аппарате со взвешенным слоем ионита [Ion exchange water purification in a apparatus with a suspended bed of ion exchange]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, vol. 3 (52), pp. 5–12.
9. *Ionity v khimicheskoy tekhnologii* [Ionites in chemical technology] / Otv. red. B. P. Nikolskiy i P. G. Romankov. L.: Khimiya, 1982, 416 p.
10. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon press. 1975. 414 p.
11. Wei-Ming Ni. The Mathematics of Diffusion. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2011, 122 p.
12. Todes O. M. Tsitovich O. B. *Apparaty s kipiyashchim zernistym sloyem: Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty* [Fluidized granular bed apparatuses: Hydraulic and thermal principles of operation]. L.: Khimiya, 1981, 296 p.
13. Rudobashta S. P. *Massoperenos v sisteme s tverdoy fazoy* [Mass transfer in a system with a solid phase]. Moscow: Khimiya, 1980, 248 p.
14. Smirnov N. N., Volzhinskiy A. I., Konstantinov V. A. *Raschet i modelirovaniye ionoobmennyykh reaktorov* [Calculation and modeling of ion-exchange reactors]. L.: Khimiya, 1984. 224 p.
15. Alekseev V. N. *Kolichestvennyy analiz* [Quantitative analysis]. Ed. P. K. Aghasyan. Moscow: AlianC, 2007, 504 p.
16. *Praktikum po ionnomu obmenu: uchebnoye posobiye* [Workshop on ion exchange: textbook]. V. F. Selemeneyev, G. V. Slavinskaya, V. Yu. Khokhlov [et al.]. Voronezh: Izd-vo VGU, 2004, 160 p.
17. Natareev S. V., Bakin M. A., Snegirev D. G. *Razrabotka matematicheskoy modeli ionoobmennoy oчитki vody ot soley tyazhelykh metallov v yemkostnom apparate* [Development of a mathematical model for water purification by the method of ion exchange from salts of heavy metals in a capacitive apparatus]. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'*, 2021, № 1(20), pp. 27–31.

References

Натареев Сергей Валентинович

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

Российская Федерация, г. Иваново,

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, профессор

E-mail: natoret@mail.ru

Natareev Sergej Valentinovich

Ivanovo State University of Chemistry and Technology,

Russian Federation, Ivanovo,

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: natoret@mail.ru

Ларина Анастасия Игоревна

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

Российская Федерация, г. Иваново

аспирант

E-mail: nastyushka300495@yandex.ru

Larina Anastasia Igorevna

Ivanovo State University of Chemistry and Technology,

Russian Federation, Ivanovo

graduate student

E-mail: nastyushka300495@yandex.ru

Фролова Татьяна Владиславовна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат химических наук, старший преподаватель

E-mail: frolovatanja@mail.ru

Frolova Tatiana Vladislavovna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of chemical sciences, senior lecturer

E-mail: frolovatanja@mail.ru