

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ ИОНОВ АММОНИЯ НА СМЕШАННОМ СЛОЕ ИОНИТОВ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Протасова Н.М., Поворов А.А., Липин А.А., Липин А.Г.

Протасова Наталья Михайловна, Поворов Александр Александрович

ООО «Баромембранная технология»,

г. Владимир, Россия. 600033, Владимирская область, г. Владимир, ул. Элеваторная, 6

E-mail: gip2@vladbmt.ru, vladimir@vladbmt.ru

Липин Андрей Александрович, Липин Александр Геннадьевич

Ивановский государственный химико-технологический университет,

г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7

E-mail: lipin.a@mail.ru, 157lipin@mail.ru

*В статье изучены закономерности сорбции ионов аммония из модельных растворов смесями катионообменной и анионообменной смол в статических условиях. Использовались сильноокислотный сульфокатионит в натриевой форме марки Токем-150 и сильноосновный анионит в хлор форме марки Токем-800. Изучено влияние содержания анионита в смеси смол на их статическую обменную емкость по аммонiu, солесодержание и pH воды, концентрацию аммония в ней после ионирования. Установлено, что оптимальным соотношением анионита и катионита в смеси смол является соотношение 3:7, обеспечивающее максимальное значение сорбционной емкости смеси ионитов. При данном соотношении получена изотерма сорбции. Показано влияние солесодержания модельного раствора на значения солесодержания и pH ионизированной воды. Проведенные эксперименты показали, что при выбранном соотношении анионита и катионита в смеси возможно получить воду, в которой концентрация ионов аммония и значение pH соответствуют нормам сброса воды в водоемы рыбохозяйственного назначения.*

**Ключевые слова:** ионный обмен, ионы аммония, катионит, анионит, ионообменные смолы, сточные воды

## INVESTIGATION OF AMMONIUM IONS SORPTION ON A MIXED IONITE LAYER UNDER STATIC CONDITIONS

Protasova N.M., Povorov A.A., Lipin A.A., Lipin A.G.

Protasova Natalya Mikhailovna, Povorov Alexander Alexandrovich

LLC "Baromembrane technology",

Vladimir, Russia. 600033, Vladimir region, Vladimir, Elevatoraya str., 6

E-mail: gip2@vladbmt.ru, vladimir@vladbmt.ru

Lipin Andrey Alexandrovich, Lipin Alexander Gennadievich

Ivanovo State University of Chemistry and Technology,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7

E-mail: lipin.a@mail.ru, 157lipin@mail.ru

*This article examines the sorption of ammonium ions from model solutions by mixtures of cation- and anion-exchange resins under static conditions. Tokem-150, a strongly acidic sodium sulfonic cation exchange resin, and Tokem-800, a strongly basic chlorine-form anion exchange resin, were used. The effect of anion exchange resin content in the resin mixture on their static exchange capacity for ammonium, the salinity and pH of water, and the ammonium concentration in it after ionization was studied. It was found that the optimal ratio of anion exchange resin to cation exchange resin in the resin mixture is 3:7, ensuring the maximum sorption capacity of the ion exchange resin mixture. With this ratio the sorption isotherm was obtained. The effect of the salinity of the model solution on the salinity and pH of the ionized water was shown. The experiments have shown that with the selected ratio of anionite and cationite in the mixture, it is possible to obtain*

*water in which the concentration of ammonium ions and the pH value correspond to the standards for water discharge into water bodies for fishery purpose.*

**Keywords:** ion exchange, ammonium ions, cationite, anionite, ion exchange resins, wastewater

**Для цитирования:**

Протасова Н.М., Поворов А.А., Липин А.А., Липин А.Г. Исследование сорбции ионов аммония на смешанном слое ионитов в статических условиях. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 4. С. 137-142. DOI: 10.6060/snt.20258404.00018.

**For citation:**

Protasova N.M., Povorov A.A., Lipin A.A., Lipin A.G. Study of sorption of ammonium ions on a mixed layer of ion exchangers under static conditions. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 137-142. DOI: 10.6060/snt.20258404.00018.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воды аммиачным азотом представляет собой реальную проблему во многих регионах мира. Источниками загрязнения водных объектов ионами аммония являются промышленные отходы, фильтраты полигонов твердых бытовых отходов, сельскохозяйственные стоки и отходы жизнедеятельности человека [1-4]. Аммиачный азот в поверхностных водах ускоряет эвтрофикацию и вреден для водных организмов. Предельно допустимая концентрация (ПДК) аммиака в воде водоемов рыбохозяйственного назначения, согласно приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552, составляет 0,05 мг/л. Поэтому сточные воды перед сбросом в водоемы необходимо очищать, в том числе от ионов аммония.

Для удаления ионов аммония из водных растворов используется ряд биологических и физико-химических методов [5]. Биологические методы используют бактерии для преобразования аммония в газообразный азот посредством нитрификации и денитрификации [6]. Физико-химические технологии включают в себя химическое осаждение, фотокаталитическое окисление, отгонку воздухом, мембранную фильтрацию, обратный осмос, адсорбцию и ионный обмен [7-10]. Эффективность биологической нитрификации и денитрификации значительно снижается при низких температурах зимой [11] и при больших нагрузках по аммиаку. Методы ионного обмена и адсорбции считаются лучшим выбором для очистки сточных вод, загрязненных аммонием. Это обусловлено высокой эффективностью удаления, простотой применения и эксплуатации, способностью выдерживать шоковые нагрузки и работать в широком диапазоне температур [7, 11-17].

Для удаления ионов аммония из сточных вод применялось большое количество адсорбентов, среди которых были различные типы цеолитов, глины, бентонит, активированный уголь и синтетические ионообменные смолы [7]. Последние

особенно высоко эффективны при относительно небольшой начальной концентрации ионов аммония в воде (~ 50 мг/л).

В ООО «БМТ» разработана и внедрена технология удаления ионов аммония из сточных вод полигонов твердых бытовых отходов с использованием комбинированной схемы, включающей двухступенчатый обратный осмос и ионный обмен [18]. По этой технологии пермеат со стадии обратного осмоса проходит доочистку на анионообменном и катионообменном фильтрах. Из опыта эксплуатации известно, что эффективность ионообменного удаления аммония и ресурс смол сильно зависят от значения pH воды на входе в ионообменные фильтры. В ряде случаев вода, прошедшая ионообменный фильтр, имеет значения pH, не удовлетворяющие нормам сброса воды в водоемы рыбохозяйственного назначения. Для получения чистой воды необходимо исключить обратимость реакций ионного обмена. Это достигается с помощью смешанного слоя ионитов, когда в одном реакторе в перемешанном состоянии находятся катионит и анионит. Благодаря очень близкому соседству положительно и отрицательно заряженных ионитов в смеси, состоящей из сильнокислотного катионита и сильноосновного анионита, практически одновременно протекают реакции, которые в сумме обеспечивают необратимость процесса, трудно достигаемую при раздельном ионировании. Выбор оптимального соотношения катионита и анионита является актуальной задачей.

Цель настоящего исследования заключалась в определении оптимального соотношения катионита и анионита в смеси ионообменных смол, обеспечивающего очищение воды до норм сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали синтетические ионообменные смолы марок Токем-150 и Токем-800, некоторые их характеристик приведены в табл. 1. Токем-150 представляет собой сильнокислотный

сульфокатионит в натриевой форме, а Токем-800 сильноосновный анионит в хлор форме.

В качестве модельных использовались растворы хлорида аммония. Приготовление модельных растворов осуществлялось с применением Государственного стандартного образца ГСО 7786-2000 и обессоленной воды марки А.

Определение концентрации ионов аммония в растворах проводилось спектрофотометрическим методом. Для измерения оптической плотности растворов использовался спектрофотометр ЭКРОС ПЭ-5400ВИ.

Для изучения сорбции ионов  $\text{NH}_4^+$  использовали метод ограниченного объема при соотношении твердой и жидкой фаз 0,5:200 (г/мл). Исследования проводились при начальных концентрациях ионов аммония 5-50 мг/л.

Сорбционное равновесие изучали при температуре 20-22 °С в статических условиях методом переменных концентраций. Для этого навеску воздушно-сухого сорбента массой 0,5 г заливали 200 мл раствора, содержащего ионы  $\text{NH}_4^+$ . Для анализа на содержание ионов аммония отбирали надосадочную жидкость, образовавшуюся после фазового разделения.

Статическая обменная емкость (СОЕ) рассчитывалась по формуле (1):

$$\text{COE} = \frac{(C_0 - C)V}{m \cdot M_{\text{NH}_4^+}}, \quad (1)$$

где V – объем раствора, л;  $C_0$  и C – начальная и равновесная концентрации ионов аммония в растворе соответственно, мг/л; m – масса сорбента, г;  $M_{\text{NH}_4^+}$  – эквивалентный вес ионов аммония.

Таблица 1

Характеристика образцов ионообменных смол  
Table 1. Characteristics of ion exchange resin samples

Марка	Тип	Матрица	Функциональные группы	Размер частиц, мм	Сорбционная емкость, г-экв/л
Токем 150	К	Полистирол - ДВБ	$-\text{SO}^{3-}$	0,315-1,25	Не менее 1,8
Токем 800	А	Полистирол - ДВБ	$-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$	0,4-1,25	Не менее 1,2

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы была изучена сорбция ионов аммония смесями катионита Токем-150 и анионита Токем-800 в статических условиях. Полученные результаты представлены на рис. 1-4.

График (рис. 1) иллюстрирует зависимость статической обменной емкости по аммонiu (СОЕ) от содержания анионита в смеси ионитов  $C_A$ . Концентрация аммония в модельном растворе составляла 50 мг/л. Зависимость СОЕ от  $C_A$  носит экстремальный характер с максимумом при  $C_A=30\%$ . Максимальное значение СОЕ составляет 0,76 мг-экв/г. СОЕ возрастает в интервале содержаний анионита 0-30% и уменьшается при  $C_A=30-90\%$ . Минимальное значение СОЕ составляет 0,13 мг-экв/г при  $C_A=90\%$ .

На рис. 2 показано влияние содержания анионита в смеси смол на значения pH и концентрацию аммония в ионированной воде. Значение pH ионированной воды уменьшается с 8,6 до 6,7 при увеличении содержания анионита в смеси с 0 до 90%. Изменение pH при ионировании может быть объяснено различными константами диссоциации катионитов и анионитов смеси. При увеличении содержания анионита  $C_A$  в смеси смол закономерно увеличивается концентрация аммония  $C_{\text{NH}_4}$  в иониро-

ванной воде, что связано с уменьшением количества катионной смолы.

По критериям: обменная емкость, концентрация аммония в ионированной воде, значение pH ионированной воды было выбрано оптимальное содержание анионита в смеси  $C_A=30\%$ . При таком содержании анионита зафиксировано максимальное значение СОЕ, а содержание аммония и pH фильтрата соответствуют нормам сброса воды в водоемы рыбохозяйственного назначения.

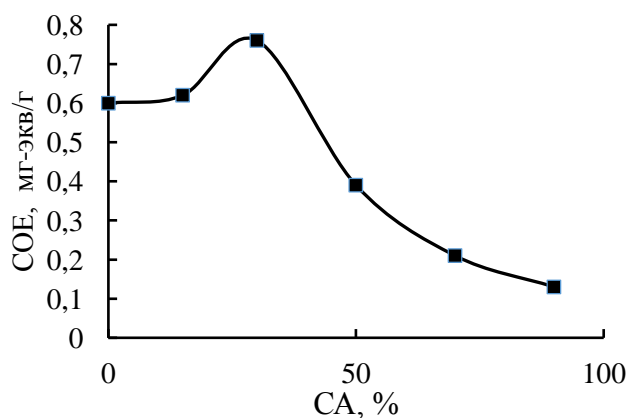


Рис. 1. Влияние содержания анионита в смеси смол на их статическую обменную емкость по аммонiu  
Fig. 1. The effect of the anionite content in the resin mixture on their static exchange capacity for ammonium

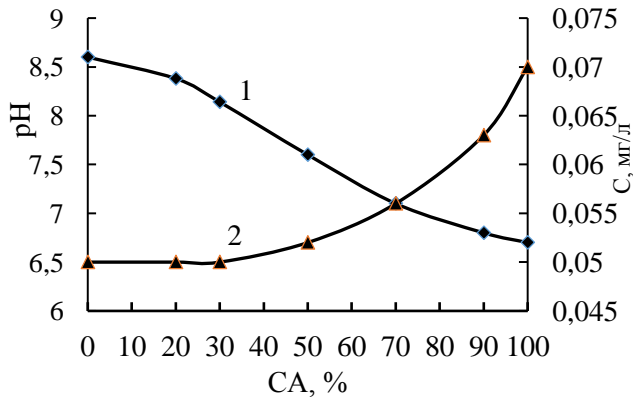


Рис. 2. Влияние содержания анионита в смеси смол на значения pH (1) и концентрацию аммония (2) в ионированной воде  
Fig. 2. The effect of the anionite content in the resin mixture on the pH (1) and the ammonium concentration (2) of the resin mixture filtrate

Анионообменные и катионообменные смолы, а также их смеси способны изменять солесодержание и значение pH ионированной воды. Были проведены исследования по определению влияния содержания анионита в смеси смол на солесодержание (TDS) и значение pH ионированной воды. При этом учитывалось возможное колебание солесодержания очищаемой воды. Очистке подвергались модельные растворы с концентрацией ионов аммония 5 мг/л, pH=7,2 и разным начальным солесодержанием. Солесодержание раствора составляло 15-17 мг/л и 33-34 мг/л. Полученные результаты представлены на рисунках 3, 4.

Значение pH ионированной воды уменьшается с 6,5-7,5 до 4,9-5,2 при росте содержания анионита в смеси с 0 до 90 % (рис. 3). При меньшем солесодержании исходного раствора (линия 1 на рис. 3) значения pH ионированной воды были выше, чем при большем солесодержании, но при увеличении доли ионита в смеси эта разница уменьшается. При  $CA=30\%$  значение pH ионированной воды соответствует нормам при значениях солесодержания исходной воды  $TDS_0=15-17$  мг/л.

В интервале содержания анионита в смесях 20-90 % солесодержание ионированной воды остается практически постоянным (рис. 4). Такое поведение смеси анионообменных и катионообменных смол объясняется гидролизом их солевых форм.

При выбранном содержании анионита ( $CA=30\%$ ) была определена величина равновесной COE ионов аммония. Интервал концентраций аммония  $C$  в исходной воде соответствует значениям, получаемым после второй ступени осмоса на реальных водах полигонов ТБО. Полученные результаты представлены на рис. 5.

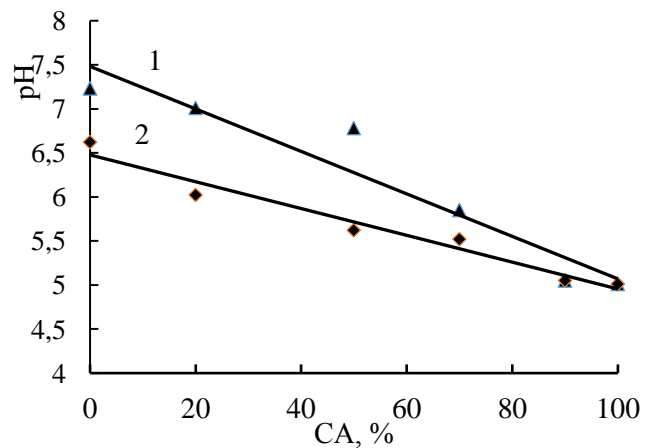


Рис. 3. Влияние содержания анионита в смеси смол на значения pH ионированной воды при различных солесодержаниях модельного раствора  $TDS_0$ , мг/л: 1 – 15-17; 2 – 33-34  
Fig. 3. The effect of the anionite content in the resin mixture on the pH of ionized water at different salinity levels of the model solution ( $TDS_0$ ), mg/l: 1 – 15-17; 2 – 33-34

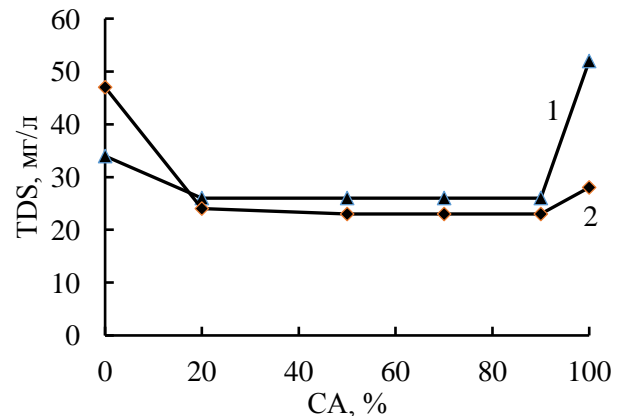


Рис. 4. Влияние содержания анионита в смеси смол на солесодержание ионированной воды при различных солесодержаниях модельного раствора  $TDS_0$ , мг/л: 1 – 15-17; 2 – 33-34  
Fig. 4. The effect of the anionite content in the resin mixture on the salinity of ionized water at different salinity levels of the model solution ( $TDS_0$ ), mg/l: 1 – 15-17; 2 – 33-34

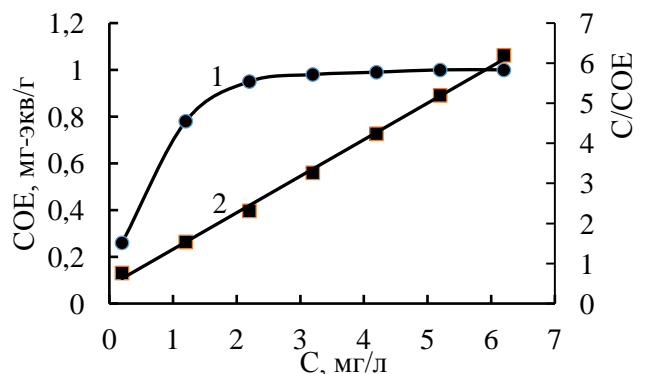


Рис. 5. Изотерма сорбции (1) и линеаризованная изотерма сорбции (2) ионов аммония на смеси анионита и катионита при содержании анионита в смеси  $CA=30\%$   
Fig. 5. Isotherm of sorption (1) and linearized isotherm of sorption (2) of ammonium ions on a mixture of anionite and cationite with an anionite content in the mixture  $CA = 30\%$

Экспериментальные данные хорошо описываются изотермой сорбции Ленгмюра (2), что иллюстрирует прямая 2 на рис. 4.

$$\text{COE} = \text{COE}_{\infty} \cdot \frac{K \cdot C}{1 + K \cdot C}, \quad (2)$$

где  $\text{COE}_{\infty}$  – максимальная величина сорбции;  $K$  – константа адсорбционного равновесия.

Путем математической обработки экспериментальной изотермы сорбции получены значения коэффициентов уравнения Ленгмюра:  $\text{COE}_{\infty}=1,0963$ ,  $K=2,0615$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования процесса сорбции ионов аммония смесями ионообменных смол марок Токем-150 и Токем-800 позволили установить рациональное соотношение анионообмен-

ной и катионообменной смолы. Такое соотношение наблюдается при 30% доле анионита в смеси. Получена изотерма сорбции ионов аммония на смеси ионитов с указанным соотношением анионита и катионита, которая линейаризована в координатах уравнения Ленгмюра. Показана возможность получения очищенной воды с содержанием ионов аммония и показателем pH, соответствующих экологическим нормам. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение динамики процесса сорбции ионов аммония на смеси анионита и катионита и определение динамической обменной емкости смешанного слоя ионитов.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Adam M.R., Othman M.H.D., Abu Samah R., Puteh M.H., Ismail A.F., Mustafa A., Rahman M.A., Jaafar J. Current trends and future prospects of ammonia removal in wastewater: a comprehensive review on adsorptive membrane development. *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 213. N 1. P. 114–132. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.12.030.
2. Vaiciukyniene D., Mikelsonienė A., Baltušnikas A., Kantautas A., Radzevičius A. Removal of ammonium ion from aqueous solutions by using unmodified and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-modified zeolitic waste. *Scientific Reports*. 2020. V. 10. 352. DOI: 10.1038/S41598-019-55906-0.
3. Leszczyński J. Removal of Ammonium Ions from Aqueous Solutions Using Weathered Halloysite. *Materials*. 2021. V. 14. 4359. DOI: 10.3390/ma14164359.
4. Fang K., Peng F., Gong H. Ammonia removal from low-strength municipal wastewater by powdered resin combined with simultaneous recovery as struvite. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2021. V. 15. 8. DOI: 10.1007/s11783-020-1300-7.
5. Медведева И.В., Медведева О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. Новые композитные материалы и процессы для химических, физико-химических и биохимических технологий водоочистки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 6–27. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.
6. Пан Л. С., Бахирева О. И., Зелина М. А., Кочина Е. А. Микробиологический метод очистки сточных вод от аммонийного азота. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2017. № 4. С. 37-49. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.03.
7. Han B., Butterly C., Zhang W., He J.Z., Chen D. Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. V. 283. 124611. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124611.
8. Gui S., Mai Z., Fu J., Wei Y., Wan J. Transport models of ammonium nitrogen in wastewater from rare earth smelteries by reverse osmosis membranes. *Sustainability*. 2020. V. 12. N 15. 6230. DOI: 10.3390/su12156230.

#### REFERENCES

1. Adam M.R., Othman M.H.D., Abu Samah R., Puteh M.H., Ismail A.F., Mustafa A., Rahman M.A., Jaafar J. Current trends and future prospects of ammonia removal in wastewater: a comprehensive review on adsorptive membrane development. *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 213. N 1. P. 114–132. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.12.030.
2. Vaiciukyniene D., Mikelsonienė A., Baltušnikas A., Kantautas A., Radzevičius A. Removal of ammonium ion from aqueous solutions by using unmodified and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-modified zeolitic waste. *Scientific Reports*. 2020. V. 10. 352. DOI: 10.1038/S41598-019-55906-0.
3. Leszczyński J. Removal of Ammonium Ions from Aqueous Solutions Using Weathered Halloysite. *Materials*. 2021. V. 14. 4359. DOI: 10.3390/ma14164359.
4. Fang K., Peng F., Gong H. Ammonia removal from low-strength municipal wastewater by powdered resin combined with simultaneous recovery as struvite. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2021. V. 15. 8. DOI: 10.1007/s11783-020-1300-7.
5. Medvedeva I.V., Medvedeva O.M., Studenok A.G., Studenok G.A., Tseytlin E.M. New composite materials and processes for chemical, physico-chemical and biochemical technologies of water purification. *ChemChemTech [Изв. Высш. Учебн. Завед. Хим. Хим. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 1. P. 6–27. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.
6. Pan L.S., Bakhireva O.I., Zelina M.A., Kochina E.A. Microbiological method of wastewater treatment from ammonium nitrogen. *Bulletin of the perm national research polytechnic university. Chemical technology and biotechnology*. 2017. N 4. P. 37-49. (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.03.
7. Han B., Butterly C., Zhang W., He J.Z., Chen D. Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. V. 283. 124611. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124611.
8. Gui S., Mai Z., Fu J., Wei Y., Wan J. Transport models of ammonium nitrogen in wastewater from rare earth smelteries by reverse osmosis membranes. *Sustainability*. 2020. V. 12. N 15. 6230. DOI: 10.3390/su12156230.

9. Перельгин Ю. П., Гришин Б. М., Салмин С. М. Удаление соединений аммиака из водных растворов и сточных вод. *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 4(45). С. 110-115.
10. Смирнова Н.Н., Зенева Т.С. Физико-химические методы удаления из сточных вод свободного аммония, аммонийсодержащих солей и органических комплексов. *Вода: химия и экология*. 2014. № 7. С. 31 – 37.
11. Prajapati J.C., Syed H. S., Chauhan J. Removal of Ammonia from wastewater by ion exchange technology. *International journal of innovative research in technology*. 2014. V.1. N 9. P. 6-11.
12. El-Ghobashy M. A., Khamis M. M., Elsherbiny A. S., Salem I. A. Selective removal of ammonia from wastewater using Cu(II)-loaded Amberlite IR-120 resin and its catalytic application for removal of dyes. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. V. 30 N 49. P. 106822-106837. DOI 10.1007/s11356-023-25677-3.
13. Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурин Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
14. Липин А.Г., Липин А.А. Энерго- и ресурсосберегающие процессы с участием полимерной фазы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 203–213. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6836j.
15. Ruiz-Cosgaya L., Izquierdo W. A., Martínez-Guijarro R., Serralta J., Barat R. Ion exchange columns. A promising technology for nitrogen and phosphorus recovery in the main line of a wastewater treatment plant. *Journal of Environmental Management*. 2024. V. 370. 122719. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122719.
16. Натарева С.В., Ларина А.И. Ионообменная очистка воды в аппарате с прямоточным движением ионита и раствора. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 3 (79). С. 82-86. DOI: 10.6060/snt.20247903.00013.
17. Натарева С.В., Ларина А.И., Рябиков А.А., Сырбу С.А. Нестационарные процессы ионообменной сорбции ионов цинка в аппарате с плотным движущимся слоем ионита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 101–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7090.
18. Поворов А.А., Ильина М.Е., Селиванов О.Г., Курочкин И.Н. Оценка эффективности мембранного разделения высококонцентрированных фильтрационных вод полигона ТБО на двухступенчатой установке обратного осмоса. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 142–155. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-8.
9. Perelygin YU.P., Grishin B.M., Salmin S.M. Removal of ammonia compounds from aqueous solutions and waste water. *Regional architecture and construction*. 2020. N 4(45). P. 110-115. (in Russian).
10. Smirnova N.N., Zeniova T.S. Physicochemical methods of free ammonium, ammonium-containing salts and organic complexes removal from wastewater. *Water: chemistry and ecology*. 2014. N 7. P. 31 – 37. (in Russian).
11. Prajapati J.C., Syed H. S., Chauhan J. Removal of Ammonia from wastewater by ion exchange technology. *International journal of innovative research in technology*. 2014. V.1. N 9. P. 6-11.
12. El-Ghobashy M. A., Khamis M. M., Elsherbiny A. S., Salem I. A. Selective removal of ammonia from wastewater using Cu(II)-loaded Amberlite IR-120 resin and its catalytic application for removal of dyes. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. V. 30 N 49. P. 106822-106837. DOI 10.1007/s11356-023-25677-3.
13. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of the development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6845j.
14. Lipin A.G., Lipin A.A. Energy- and resource-saving processes involving the polymer phase. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 203–213. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6836j.
15. Ruiz-Cosgaya L., Izquierdo W. A., Martínez-Guijarro R., Serralta J., Barat R. Ion exchange columns. A promising technology for nitrogen and phosphorus recovery in the main line of a wastewater treatment plant. *Journal of Environmental Management*. 2024. V. 370. 122719. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122719.
16. Natareev S. V., Larina A. I. Ion-exchange water purification in a device with direct flow of ion exchanger and solution. *Modern high technology. Regional application*. 2024. N 3 (79). P. 82-86. DOI: 10.6060/snt.20247903.00013.
17. Natareev S.V., Larina A.I., Ryabikov A.A., Syrbu S.A. Unsteady processes of ion exchange sorption of zinc ions in a dense moving ion exchanger bed apparatus. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 1. P. 101–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7090.
18. Povorov A.A., Ilyina M.E., Selivanov O.G., Kurochkin I.N. Evaluation of the efficiency of membrane separation of highly concentrated filtration waters of a solid waste landfill at a two-stage reverse osmosis plant. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. N 6. P. 142–155. (in Russian). DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-8.

Поступила в редакцию(Received) 30.09.2025  
Принята к опубликованию (Accepted) 30.10.2025