

3. Дмитриев, В.Д. Методы подготовки воды в условиях Севера / В.Д. Дмитриев. – Л.: Стройиздат, 1981. – 120 с.
4. Слипченко, А.В. Конструирование электролизера для электроокислительной обработки природных вод / А.В. Слипченко, В.В. Максимов. – Киев: Стр-во и архит. – 1990. – №11. – С. 84–89.
5. Бейгельдруд, Г.М. Электрохимическая очистка воды / Г.М. Бейгельдруд // Достиж. науки и техн. АПК. – 1993. – №3. – С. 27.
6. Силин, Е.А. Экспериментальные и конструктивные исследования в области электрохимической очистки питьевых вод / Е.А. Силин, З.Я. Ярославский // Труды ВНИИ ГИМ. Вып. 44. – М., 1964. – С. 197–200.
7. Строкач, П.П. Экология гидросферы / П.П. Строкач, Н.П. Яловая. – Брест: БГТУ, 2004. – 322 с.
8. Устройство для электрохимической очистки воды от растворенных примесей: пат. кл. 204-197 США, С 02 В № 3425925, опубл. 4.11.1989.
9. Электрокоагулятор для очистки сточных жидкостей: а.с. 1810305 СССР, МКИ5 С 02 F 1/46, В 03 С 5/00 / Н.Н. Тролль, М.Г. Журба, Л.Л. Литвиненко, Н.В. Яцков, В.В. Ковалев, А.П. Ткач. – № 4931960/26; заявл. 29.04.91; опубл. 23.04.93. – 1993. – Бюл. № 15.
10. Аппарат для электрической обработки сточных вод: франц. пат., кл. С 02 С, № 1548402, опубл. 28.10.1986.
11. Реактор-электрокоагулятор для обработки воды: а.с. СССР, кл. 85 в, 2/01; 12д 2/01 / Е.Ф. Кургаев Е.Ф. [и др.] – Оpubл. 6.11.1967. – Бюл. № 23.
12. Устройство для очистки воды от находящихся в ней взвешенных и растворенных примесей под действием электрического тока: а.с. 179685 СССР, МПК С 02, кл. 85 в / П.П. Пальгунов – Оpubл. 04.04.1966. – Бюл. № 25.
13. Evans, S. Electronic coagulator / S. Evans // Water Works Engineering. – 1966. – Vol. 99, №4. – P. 56–62.
14. Сковрцова, И.В. Новые малорастворимые аноды из аморфных сплавов для электрохимической очистки сточных и природных вод / И.В.Сковрцова, Н.Д. Томашов, А.И. Щербаков // Материалы XV Менделеев. съезда по общ. и прикл. химии, Минск, 24–29 мая 1993 г. – Минск, 1993. – Т.4. – С. 175–176.
15. Кульский, Л.А. Технология очистки природных вод / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – К.: Вища школа, 1981. – 328 с.
16. Coagulant control by streaming current technology // Water and Waste Treat (Gr. Britt.). – 1989. – Vol. 32, №3. – P. 1–5, 38.
17. Камалов, М. Разработка мембранного электролизера и технологии электрохимического приготовления раствора смешанного железо-алюминиевого коагулянта: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04, 14.00.07 / М. Камалов. – М., 2003. – 170 с.
18. Введение в воду ионов тяжелых металлов методом анодного растворения: франц. пат., кл. С 02 В, № 1502660, опубл. 16.10.1976.
19. Метод удаления из воды ионов железа, марганца и других металлов: франц. пат., кл. С 02 С, №1486434, опубл. 7.02.1986.
20. Система электродов для очистки воды методом электролиза многофазным переменным током: яп. пат. № 3361 / Акагами Йо-дзо. – Оpubл. 9.04.1980.
21. Обработка воды методом электролиза: яп. пат. № 3638 / Сасаки Тору. – Оpubл. 6.04.1984.
22. Электрокоагулятор для очистки жидкостей: а.с. 1810305 СССР, МКИ 5 С 02 F 1/46, В 03 С 5/00 / Н.Н. Тролль, М.Г. Журба, Л.Л. Литвиненко [и др.]. – № 4931960/26; Заявл. 29.04.91; Оpubл. 23.04.93. – Бюл. № 15.
23. Герасимов, И.В. Очистка сточных вод общего стока нефтеперерабатывающих заводов постоянным электрическим током с применением флотации / И.В. Герасимов // Тр. Уфим. нефт. ин-та. Вып. 3. – 1980. – С. 45–48.
24. Назаров, В.Д. Тенденции развития водоподготовки от физико-химических до электрокоагуляционных процессов / В.Д. Назаров [и др.] // Башк. хим. журнал. Т. 11. – 2005. – № 5. – С. 97–99.
25. Лукашев, Е.А. Электрохимическая коррозия / Е.А. Лукашев, Г.Н. Лукашева, И.П. Соколов. – М.: МГУС, 2002. – 68 с.
26. Макарова, Е.Г. Электрохимическое умягчение воды / Е.Г. Макарова, В.К. Любимов. – Пермь: Изд-во Всес. н.-и. и проект.-конструкт. ин-та охраны окруж. природ. среды в угол. пром-сти, 1998. – 11 с.
27. Пономарев, В.Д. Поведение коллоидных систем при электрокоагуляции / В.Д. Пономарев, Д.А. Тараскин // Геолог. горн. дело: металлургия: сб. научн. тр. Казахского горно-металлург. ин-та. – М., 1989. – № 16. – С. 51–55.
28. Шахин, Х. Очистка воды электрокоагуляцией: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Х. Шахин. – Киев: КИСИ, 1999. – 134 с.
29. Способ очистки природных вод: пат. РФ № 2121979, кл. С 02 F 1/463 / В.А. Чантурия, Г.П. Двойченкова, Э.А. Трофимова. – Оpubл. 20.11.98. – Бюл. № 32.
30. Ганбаров, Э.С. Совместное применение электрохимических и сорбционных методов очистки воды / Э.С. Ганбаров // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 6. – С. 25–31.

Материал поступил в редакцию 12.01.10

#### STROKACH P.P., YALOVAJA N.P. Electroprecipitation preparation of natural waters

The technological features electroprecipitation of clearing of natural waters are considered. The characteristics electrocapacity with various design features and modes of operation are given. The advantages and lacks of designs of devices for electroprecipitation are proved. The conditions for prevention passivation of electrodes are considered.

УДК 628.16

**Житенев Б.Н., Андрюк С.В.**

### ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕГЕНЕРАЦИИ ИОНООБМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА

**Введение.** Большое количество ионообменных установок, введенных в промышленность в последние годы, привело к резкому увеличению расхода кислот и щелочей, используемых для регенерации ионитовых смол, в то время как экономическая эффективность применения процесса ионного обмена определяется, в основном, затратами на регенерацию. Для снижения этих затрат необходимо обоснованно определить основные технологические параметры проведения процесса регенерации.

Если до сих пор не разработана теория процессов регенерации, позволяющая обоснованно рассчитать наиболее эффективные режимы проведения процесса, то на практике определились два способа, позволяющие несколько снизить расход регенерирующих средств: ступенчатая регенерация и использование уже отработанных растворов – «возвратов» [1]. Ступенчатая регенерация и отмывка [2] заключаются в чередовании быстрого заполнения фильтра регенерирующим раствором (в процессе регенерации) или водой (в

**Житенев Б.Н.**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

**Андрюк С.В.**, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

процессе отмычки) и выдержки ионита в неподвижной жидкости в течение 5–8 минут. Периодическая (ступенчатая) регенерация ионитов является важным элементом технологии водоподготовки в промышленности [3]. Проведены исследования по регенерации катионообменной смолы КУ-2-8 в ионообменной колонке серной кислотой при наложении постоянного электрического поля. Показано, что при пропускании небольшого тока заметно увеличивается скорость регенерации. Наиболее быстрая промывка наблюдалась при небольших плотностях тока до  $0,2 \text{ А/см}^2$ . Причиной интенсификации процессов регенерации при ступенчатой регенерации, о чем свидетельствует уменьшение количества регенерирующего раствора в 1,3 раза, исследователи считают нарушение поверхностного слоя жидкости у зерен ионитов и нарушение избирательных ходов, образуемых жидкостью в фильтре при периодическом чередовании спокойного состояния и большой скорости вытекания жидкости из фильтра. Однако способа расчета ступенчатой регенерации не существует.

Другим способом повышения экономичности регенерации является повторное использование последних фракций отработанного регенерирующего раствора, оставшегося от предыдущей регенерации – то есть возвратов [4, 5]. Пока не существует методов расчета регенерации с учетом возвратов, нельзя также определить по приведенным в статьях данным, какая концентрация десорбируемого иона допускается в растворах, используемых в качестве возвратов. Опыт эксплуатации фильтров с противоточной технологией регенерации ионитов для водоподготовки химических цехов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Волжского [6] показал, что при использовании параллельноточных фильтров удельные расходы кислоты и щелочи составляют порядка 3 г-экв/г-экв. Фильтры с противоточными регенерациями работают с удельными расходами кислоты и щелочи не больше 2 г-экв/г-экв. Использование противоточных фильтров, в составе ВПУ обеспечивает экологический, экономический и технический эффект.

Анализ работ по теории сорбции и десорбции [5, 6, 7] показывает, что при изучении динамики ионного обмена основными факторами, влияющими на процесс регенерации, наряду с равновесными и кинетическими параметрами, являются: концентрация и вид элюирующего раствора, скорость протекания раствора через ионит, геометрические

размеры ионообменной колонки и другие, которые были определены нами для конкретного случая из экспериментов [8].

**Исследование динамики ионообменной десорбции нитрат-ионов с использованием элюирующего раствора едкого натра NaOH.** При исследовании динамики ионообменной десорбции нитрат-ионов из высокоосновного анионита в лаборатории кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов БрГТУ опыты проводились в неподвижных слоях ионита, относительно которых непрерывно обновлялся десорбирующий раствор. Исследования проводились на анионите марки АВ-17-8. Степень извлечения (регенерации)  $F$  определяли путем анализа фильтрата на выходе из ионообменной колонки. Кривые зависимостей служили для расчета основных параметров динамики десорбции нитрат-ионов из анионита АВ-17-8 и для определения реальных оптимальных условий работы колонны. Регенерирующие растворы едкого натра NaOH различной концентрации, приготовляемые и пропускаемые через загрузку фильтра с учетом рекомендаций СНиП [9], по-разному восстанавливали обменную емкость анионита в одни и те же интервалы времени регенерации.

**Анализ результатов эксперимента.** На рис. 1 показаны выходные кривые десорбции нитратов при постоянной скорости потока десорбирующего раствора  $w = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  и высоте слоя ионита при соотношении высоты колонны к диаметру  $H/D = 7,2$  [8] в зависимости от концентрации регенерирующего раствора. Из рисунка видно, что принятая концентрация раствора NaOH, равная  $C_{\text{NaOH}} = 4\%$  при регенерации анионита, участвовавшего в задержании соединений азота, оказалась оптимальной. Применение 10%-ного раствора NaOH увеличивает  $F$  только на 7-10% по сравнению с  $F$  для  $C_{\text{NaOH}} = 4\%$ . Результаты расчетов  $(F(C_{\text{NaOH}}=10\%) / F(C_{\text{NaOH}}=4\%)) = 1,16$  указывают на нецелесообразность применения десорбирующего раствора концентрацией более 4%. Ограничение области рациональных значений концентраций десорбирующих (регенерирующих) растворов NaOH в пределах до 4%, по-видимому, объясняется тем, что при любых значениях концентраций (4,5% и больше) десорбирующих

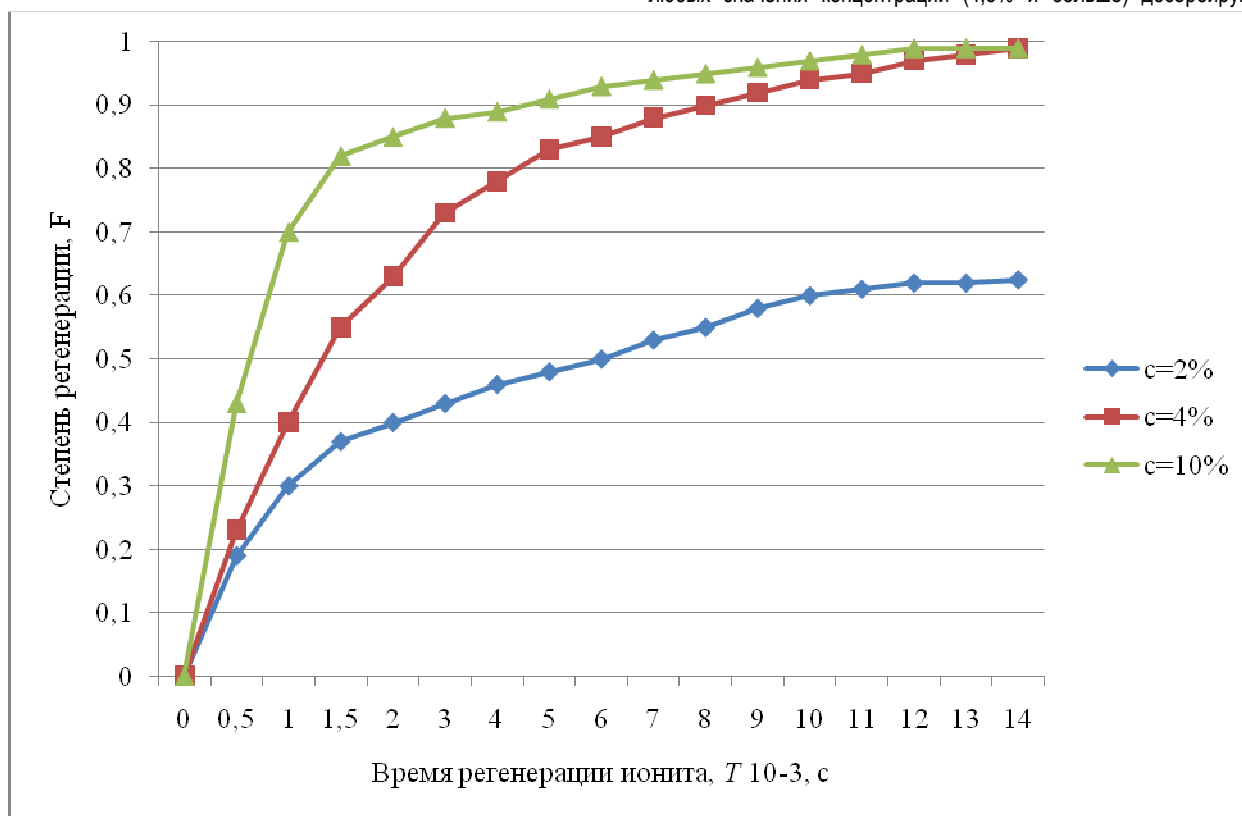


Рис. 1. Кривые десорбции соединений азота при скорости  $w = 1,8 \text{ м/ч}$  и отношении  $H/D = 7,2$  в зависимости от концентрации регенерирующего раствора  $C(\text{NaOH})$

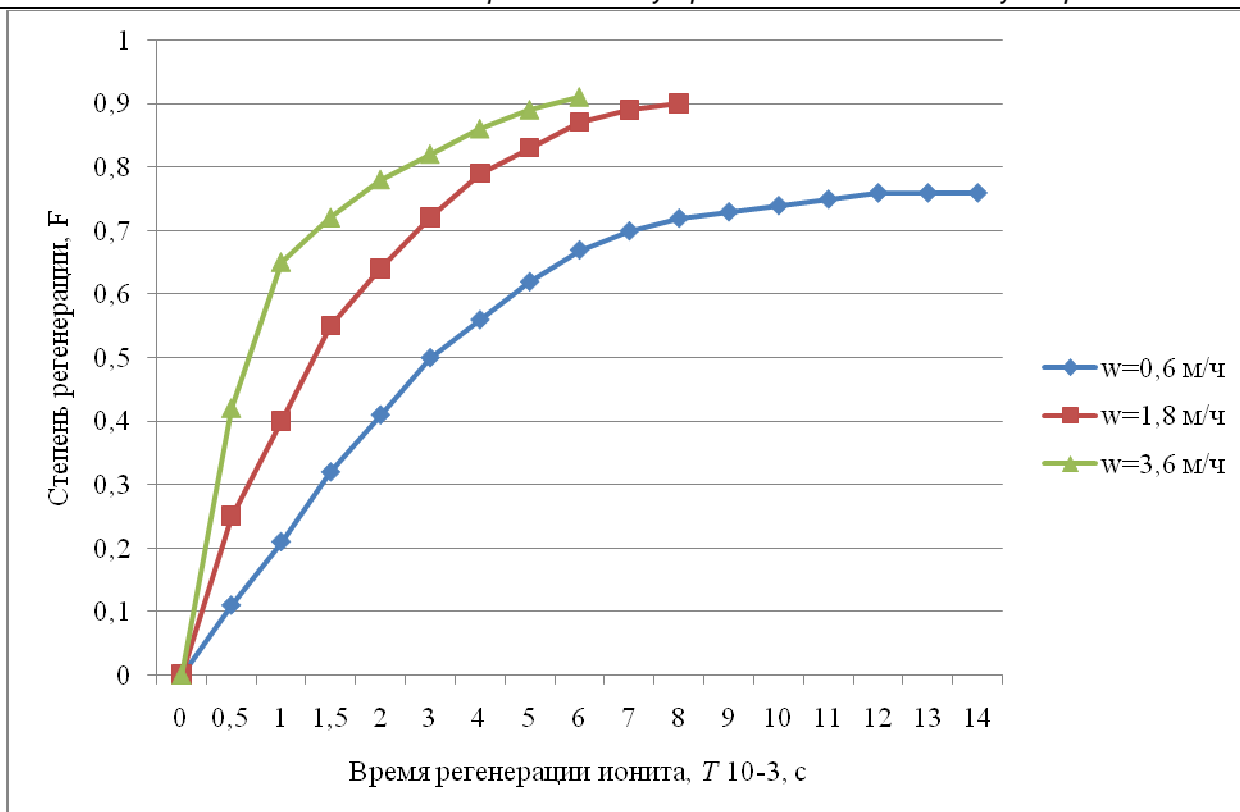


Рис. 2. Кривые десорбции соединений азота при отношении  $H/D = 7,2$  и концентрации раствора  $C(NaOH) = 4\%$  в зависимости от скорости  $w$  пропускания регенерационного раствора

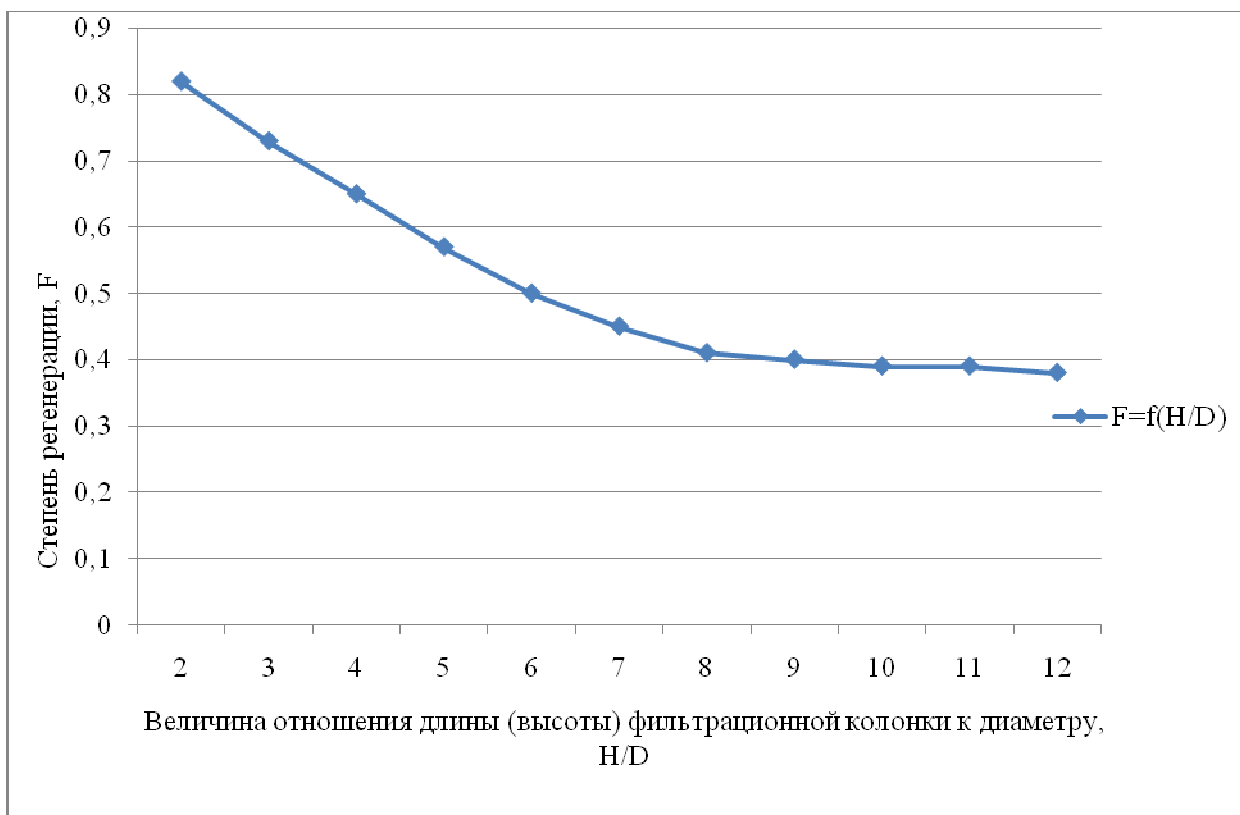


Рис. 3. Кривая зависимости степени извлечения для десорбции соединений азота из анионита  $C(NaOH) = 4\%$ ,  $w = 1,8$  м/ч,  $T = 40$  мин.

растворов степень использования десорбирующих ионов практически остается постоянной. Это обуславливается внутридиффузионной кинетикой при десорбции. Увеличение концентрации раствора

не приводит к заметному ускорению процесса десорбции, т.е. процесса массопереноса внутри зерна.

Влияние скорости потока десорбирующего раствора на степень извлечения в динамических условиях изучалась в диапазоне скоро-

стей потока раствора до  $w = 2,18 \cdot 10^{-3}$  м/с (10 м/ч). Динамические кривые десорбции для нитрат-ионов при различных скоростях протекания 4%-ного раствора NaOH приведены на рис. 2.

Результаты опытов показывают положительное влияние скорости  $w$  на степень регенерации  $F$ : с увеличением  $w$  до  $1,11 \cdot 10^{-3}$  м/с (4 м/ч) время десорбции уменьшается незначительно. Следовательно, наиболее благоприятными значениями величины  $w$  являются скорости протекания раствора в диапазоне  $(0,5 \div 1,11) \cdot 10^{-3}$  м/с ( $2 \div 4$  м/ч).

Анализ зависимости степени регенерации  $F$  от величины отношения длины фильтрационной колонки к диаметру  $H/D$  (рис. 3) показал прямую зависимость времени регенерации анионита от высоты загрузки колонки [8], время 90%-ной десорбции зависит линейно от  $T_{F-0,9=f(H/D)}$  от  $H/D$ : чем больше высота загрузки, тем дольше идет процесс регенерации. Но с увеличением величины  $H/D$ ,  $\Delta F$  начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что при  $H/D = 2$  определенной высоте  $h$  слоя ионита соответствует определенный объем  $\Delta V$  десорбирующего раствора с определенным количеством противоионов. При прохождении слоя  $h$  часть противоионов в растворе десорбирует из анионита эквивалентное количество фиксированных ионов, но, еще не теряя полностью десорбирующую способность, покидают слой ионита. При увеличении значения  $H/D$ , остаточная десорбирующая возможность раствора используется в слоях  $(h + \Delta h)$ ; таким образом, один и тот же объем раствора десорбирует большее количество ионов из ионита, и время десорбции уменьшается. Дальнейшее увеличение времени десорбции и расхода регенерирующего раствора при больших значениях зависит от отрицательного воздействия десорбирующего раствора. Раствор, в начальных слоях действующий как десорбирующий, в последних слоях может служить как носитель фиксированных ионов. Следовательно, среди значений  $H/D = 2 \div 12$   $H/D = 7,2$  можно считать оптимальным, что хорошо согласуется с оптимальными параметрами работы ионообменной колонки в условиях водоподготовки или доочистки сточных вод [8, 10].

**Исследование динамики ионообменной десорбции нитрат-ионов с использованием элюирующего раствора соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .** Анализ результатов экспериментов. Исследование динамики ионообменной десорбции с использованием раствора соды проводили по методике исследования и оптимизации процессов регенерации с помощью раствора едкого натра. Были получены зависимости степени регенерации отработанного анионита от концентрации и линейной скорости пропускания регенерирующего раствора соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Анализ результатов экспериментов показал более слабую регенерационную способность раствора соды по нитрат-ионам по сравнению с раствором едкого натра. Аналогия прослеживается в нецелесообразности применения десорбирующего раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с концентрацией более 4%: применение 10%-ного раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  увеличивает степень регенерации  $F$  только на 8,57% по сравнению с  $F$  для  $C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 4\%$ ;  $(F(C_{\text{Na}_2\text{CO}_3}=10\%) / F(C_{\text{Na}_2\text{CO}_3}=4\%)) = 1,1$ .

При сравнении степени регенерации анионита с использованием различных десорбирующих растворов результаты расчетов показали, что 4%-ный раствор NaOH в 1,44 раза лучше восстанавливает обменную способность анионита АВ-17-8 по отношению к нитрат-ионам, чем 4%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  при одинаковых условиях ведения процесса регенерации:  $(F(C_{\text{NaOH}=4\%}) / F(C_{\text{Na}_2\text{CO}_3=4\%})) = 1,44$ .

**Заключение.** Исследование и оптимизация процессов регенерации ионообменных материалов, работающих в цикле удаления из воды соединений азота, представляют большой научный и практический интерес. Эксперимент показал, что полученные результаты можно использовать как основу рекомендаций на проектирование и конструирование ионообменных аппаратов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кульский, Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. – Киев: Наук. думка, 1983. – 528 с.
2. Самборский, И.В. Экономия регенерирующих средств и отмывочной воды в процессах ионного обмена / И.В. Самборский, Е.И. Касьяненко – В кн.: теория и практика сорбционных процессов. – Вып. 3. – Воронеж: ВГУ, 1989. – С. 113–115.
3. Кошель, Н.Д. Регенерация ионита в электрическом поле в ионообменной колонке. Экспериментальные результаты. Вopr. химии и хим. технол. / Н.Д. Кошель, Е.А. Магдыч, А.М. Акимов. – 2008. – N 5. – С. 147–149.
4. Червинская, О.В. Применение экономичных способов регенерации ионитовых смол в установке для глубокого обессоливания воды / О.В. Червинская [и др.] – В кн.: теория и практика сорбционных процессов. – Вып. 3. – Воронеж: ВГУ, 1989. – С. 117–125.
5. Конановский, А.М. Регенерация ионообменных смол растворами электролитов / А.М. Конановский, Е.П. Буравлев – Химическая технология, 1977. – № 6. – С. 23–24.
6. Проскурякова, Р.Г. Опыт эксплуатации фильтров с противоточной технологией регенерации ионитов для водоподготовки химических цехов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Волжского / Р.Г. Проскурякова, В.В. Еременко, И.В. Ракова, Н.А. Стребкова // Энергосбережение и водоподгот. – 2008. – N 4. – С. 43–44.
7. Слизнева, Т.Е. Моделирование процессов умягчения и обессоливания воды в аппарате с неподвижным слоем ионита: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2005. – 17 с.
8. Исследование процессов и разработка технологии очистки подземных вод от азотистых соединений в целях водоснабжения сельского населения РБ: отчет о научно-исследовательской работе (заключительный) / Брестский государственный технический университет; рук. С.В. Соколюк. – Брест, 2000. – 88 с. – № ГР 2000819.
9. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: СНиП 2.04.02-84 – М.: Стройиздат, 1989. – 136 с.
10. Li Jian-hua, Xu Chong-wu, Yang Wan-sheng, Hu Xue-wen, Zhang Bu-ming. Регенерация ионообменных смол с применением щелочи. Gongye yongshui yu feishui=Ind. Water and Wastewater. 2003. 34, N 4, с. 20-21. Кит.; рез. англ. CN. ISSN 1009-2455.

Материал поступил в редакцию 16.02.10

#### ZHYTSIANIOV B.N., ANDREYUK S.V. Study and optimization of processes of reactivation of ion-exchange materials participating in a purification process of waters from joints of nitrogen

The generalized results of study and optimization of processes of reactivation of anion exchanger АВ-17-8, participating in a purification process of waters from joints nitrogen are resulted. Dynamics of ion-exchange desorption of nitrates – ions with usage of eluting solutions of caustic soda NaOH and soda salt  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  is investigated. The curves of desorption of joints of azote from anion exchanger are obtained depending on concentration and aspect of eluting solution, speed of weep of solution through ion exchanger, geometrical sizes of an ion-exchange pillar.