

УДК 628.161.2:544.726

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-59-64

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА КЛИНОПТИЛОЛИТА  
В ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЕ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД****Е.С. ВЕЛЮГО***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)***ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6165-1929>**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров регенерации природного цеолита клиноптилолита раствором хлористого натрия. Исследования проводились в рамках двухступенчатой технологической схемы очистки подземных вод с повышенным содержанием железа, марганца, аммонийного азота и высокими показателями перманганатной окисляемости. Установлено влияние интенсивности вторичной аэрации на рабочую обменную ёмкость цеолита. Определены оптимальные удельные расходы NaCl (300–500 г/г-экв в зависимости от исходной концентрации аммония), обеспечивающие максимальную длительность фильтроцикла. Показано, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 (по объёму) позволяет снизить расход регенерационного раствора в 2–5 раз по сравнению с рекомендациями производителей.

**Ключевые слова:** подземные воды сложного состава, двухступенчатая очистка, клиноптилолит, ионный обмен, регенерация, аммонийный азот, вторичная аэрация.

**Введение.** Эксплуатация систем водоподготовки для малых населенных пунктов сталкивается с проблемой обеспечения нормативного качества воды при ее сложном составе, характеризующемся одновременным присутствием соединений железа, марганца, аммонийного азота и перманганатной окисляемости. В предшествующих исследованиях автора была обоснована эффективность двухступенчатой схемы, включающей фильтрование через сорбент АС (первая ступень) и клиноптилолитовый цеолит марки Цеол<sup>1</sup> (вторая ступень) с предварительной аэрацией на каждой ступени [1]. Ключевая роль во второй ступени отводится процессам ионного обмена, обеспечивающим удаление аммонийного азота. Однако по мере насыщения ионообменных центров возникает необходимость регенерации цеолитовой загрузки. *Цель настоящей работы* – определение оптимальных параметров регенерации цеолита раствором хлористого натрия, обеспечивающих максимальную продолжительность фильтроцикла и минимальные эксплуатационные затраты в условиях реального состава подземных вод.

**Материалы и методы исследования.** Исследования выполнялись на пилотной фильтровальной установке, подключенной после фильтров обезжелезивания первой ступени и вторичной аэрационной колонны. В качестве фильтрующего материала использован природный клиноптилолит [2] с размером зерен 0,8–1,2 мм, объем загрузки в фильтре диаметром 0,25 м составил 25 л. Скорость фильтрования поддерживалась на уровне 10 м/ч.

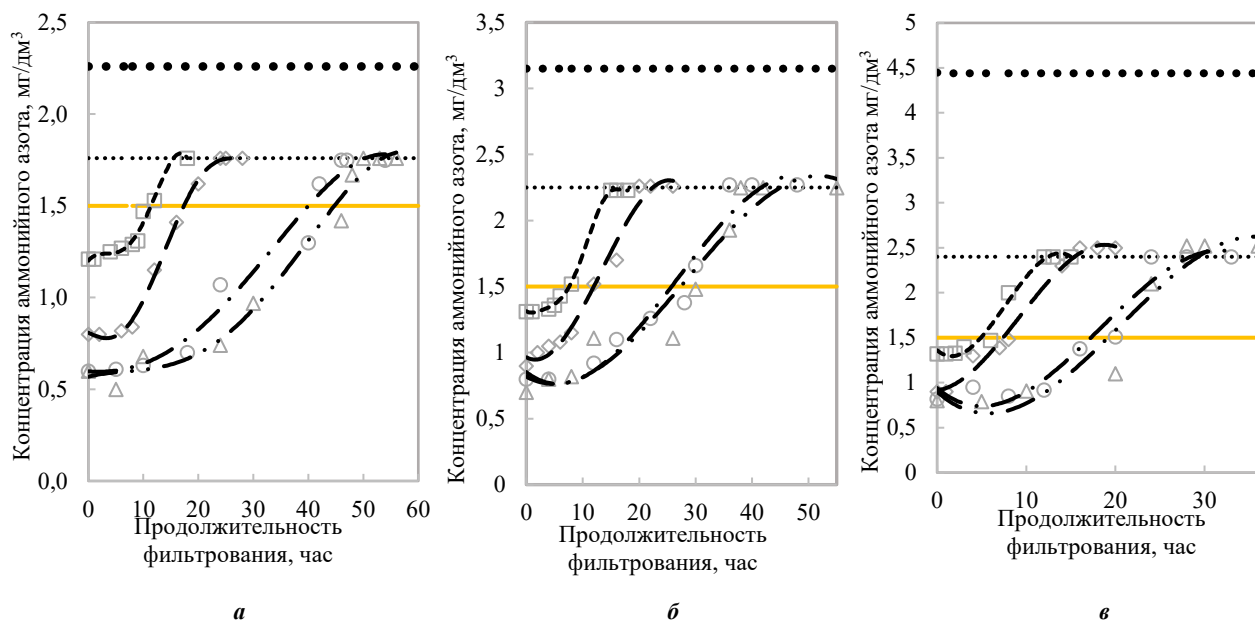
Объектами исследования выбраны три станции обезжелезивания Витебской области (объекты 1, 2, 3) с различным исходным составом (после первой ступени фильтров) подземных вод: концентрация аммонийного азота находилась в интервале от 2,26 до 4,44 мг/дм<sup>3</sup>, перманганатная окисляемость – от 4,8 до 6,8 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Концентрации аммонийного азота в воде и фильтрате определялись в лаборатории по азоту аммонийному (NH<sub>4</sub>-N). Для расчётов рабочей обменной ёмкости и удельного расхода соли все значения были пересчитаны в ион NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Все приведённые в работе концентрации, выходные кривые и расчёты даны в пересчёте на ион NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. На стадии первичной аэрации поддерживалось воздушно-водное соотношение (3–3,5):1, обоснованное ранее проведенными исследованиями [3] как оптимальное для обеспечения полного окисления Fe<sup>2+</sup> и деструкции органожелезистых комплексов. На стадии вторичной аэрации перед цеолитовым фильтром соотношение изменялось в диапазоне (0–1,5):1 для определения рационального режима доочистки.

Регенерация цеолитовой загрузки осуществлялась 8%-м (по массе) раствором хлористого натрия. Варьируемым параметром выступал удельный расход соли (от 200 до 600 г/г-экв). Эффективность регенерации оценивалась по длительности последующего фильтроцикла до достижения в фильтрате предельно допустимой концентрации аммонийного азота (1,5 мг/дм<sup>3</sup>). Рабочая обменная ёмкость цеолита рассчитывалась по стандартной методике на основе выходных кривых сорбции и ионного обмена.

**Результаты и их обсуждение.** *Влияние вторичной аэрации на рабочую ёмкость цеолита.* Экспериментально установлено, что определяющим фактором эффективности второй ступени является концентрация аммонийного азота в исходной воде. При этом уровни содержания железа, марганца и перманганатной окисляемости на выходе из установки стабильно удерживались ниже нормативных значений даже при приближении концентрации аммония к исходной.

Наиболее высокая эффективность удаления аммония достигалась при использовании вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 и 1,5:1 (рисунок 1). Рациональным признано соотношение 1:1, поскольку дальнейшее увеличение интенсивности аэрации незначительно повышает эффективность и становится экономически нецелесообразным.

<sup>1</sup> Цеолит природный: производство, поставка, применение [Электронный ресурс] // Zeol.ru: сайт. – URL: <https://zeol.ru/> (дата обращения 16.07.2025).



— норма ион-аммония  
 ••••• усредненное значение ион-аммония после первой ступени  
 ..... усредненное значение изъятия ионов аммония процессом адсорбции  
 - - - - 1 цикл: с регенерацией и без вторичной аэрации  
 — 2 цикл: регенерация и воздушно-водное соотношение вторичной аэрации 0,5:1  
 - · - 3 цикл: регенерация и воздушно-водное соотношение вторичной аэрации 1:1  
 — · · 4 цикл: регенерация и воздушно-водное соотношение вторичной аэрации 1,5:1

*a* – объект 1 ( $C_{NH_4}=2,26$  мг/дм<sup>3</sup>); *б* – объект 2 ( $C_{NH_4}=3,15$  мг/дм<sup>3</sup>); *в* – объект 3 ( $C_{NH_4}=4,44$  мг/дм<sup>3</sup>)

Рисунок 1. – Выходные кривые сорбции и ионного обмена аммонийного азота на цеолите при различном воздушно-водном соотношении

Дополнительное насыщение воды кислородом способствовало доокислению остаточных концентраций железа и марганца после первой ступени, снижению перманганатной окисляемости и, предположительно, частичному окислению аммонийного азота, что создавало благоприятные условия для последующего ионного обмена [4; 5].

*Количественная оценка рабочей обменной емкости.* Расчет рабочей обменной емкости цеолита ( $E_p$ , мг-экв/дм<sup>3</sup>) выполнялся по выходным кривым сорбции с учетом объема профильтрованной воды до момента достижения предельной концентрации аммония в фильтрате. Результаты для исследуемых объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Экспериментальные значения рабочей обменной емкости и длительности фильтроциклов

Параметр	Объект 1 ( $C_{NH_4}^{исх} = 2,26$ мг/дм <sup>3</sup> )				Объект 2 ( $C_{NH_4}^{исх} = 3,15$ мг/дм <sup>3</sup> )				Объект 3 ( $C_{NH_4}^{исх} = 4,44$ мг/дм <sup>3</sup> )			
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл
Динамическая рабочая обменная емкость $E_p$ , мг-экв/дм <sup>3</sup>	18,3	35,6	90,5	102,8	21,1	36,9	93,2	104,8	26,9	40,0	95,0	105,9
Продолжительность фильтроцикла $T$ , ч	12	17	40,5	46	8	12	29	30	6	8,0	19	21

Как видно из представленных данных, рабочая обменная емкость цеолита закономерно возрастает с увеличением номера фильтроцикла. Установлено, что в отсутствие вторичной аэрации (1-й цикл) значение  $E_p$  существенно зависит от исходной концентрации аммония, составляя 18,3–26,9 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Применение вторичной аэрации ( $V=1:1$ , 3-й цикл) нивелирует это влияние: значения  $E_p$  для разных объектов сближаются до 90,5–95,0 мг-экв/дм<sup>3</sup>, а при дальнейшем увеличении до 1,5:1 (4-й цикл) достигают практически одинакового уровня – 102,8–105,9 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Это свидетельствует о том, что вторичная аэрация эффективно устраняет факторы, лимитирующие ионный обмен (конкуренцию катионов и кольматацию пор), и обеспечивает стабильную работу фильтра независимо от исходного состава воды. Абсолютные значения  $E_p$  остаются на 41–53% ниже паспортных показателей (220 мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>,

<sup>2</sup> Наполнители для фильтров: цеолит природный [Электронный ресурс] // Гидросити: сайт. – URL: <https://gidrositi.ru/catalog/napolniteli/tseolit/> (дата обращения 16.07.2025).

приводимых производителями для модельных растворов, содержащих только аммоний. Данное расхождение объясняется конкурентным влиянием других компонентов подземных вод – железа, марганца и органических соединений, которые блокируют часть ионообменных центров или затрудняют доступ к ним.

Продолжительность фильтроцикла  $T$ , ч, ожидаемо снижается с ростом исходной концентрации аммония: при  $2,26 \text{ мг/дм}^3$  (объект 1) максимальная длительность составила 46 ч, при  $3,15 \text{ мг/дм}^3$  (объект 2) – 30 ч, при  $4,44 \text{ мг/дм}^3$  (объект 3) – 21 ч. При одинаковой удельной емкости загрузки ( $102,8\text{--}105,9 \text{ мг-экв/дм}^3$ ) время до проскока определяется скоростью поступления ионов  $\text{NH}_4^+$  к ионообменным центрам, которая пропорциональна их исходной концентрации в воде. Это указывает на необходимость дифференцированного подхода к выбору режимов регенерации в зависимости от качества исходной воды.

**Оптимизация параметров регенерации.** Исследование влияния удельного расхода хлористого натрия на эффективность регенерации проводилось в диапазоне значений  $200\text{--}600 \text{ г/г-экв}$  (рисунок 2) при воздушно-водном соотношении 1:1. Выбор данного диапазона обусловлен литературными данными по регенерации клиноптилолита в реальных подземных и сточных водах сложного состава. В присутствии конкурирующих катионов ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) и органических веществ оптимальные удельные расходы  $\text{NaCl}$  обычно составляют  $200\text{--}600 \text{ г/г-экв}$ , наиболее часто встречаясь в интервале  $300\text{--}500 \text{ г/г-экв}$  [6–8]. Более низкие значения (менее  $200 \text{ г/г-экв}$ ) характерны преимущественно для модельных растворов чистого аммония.

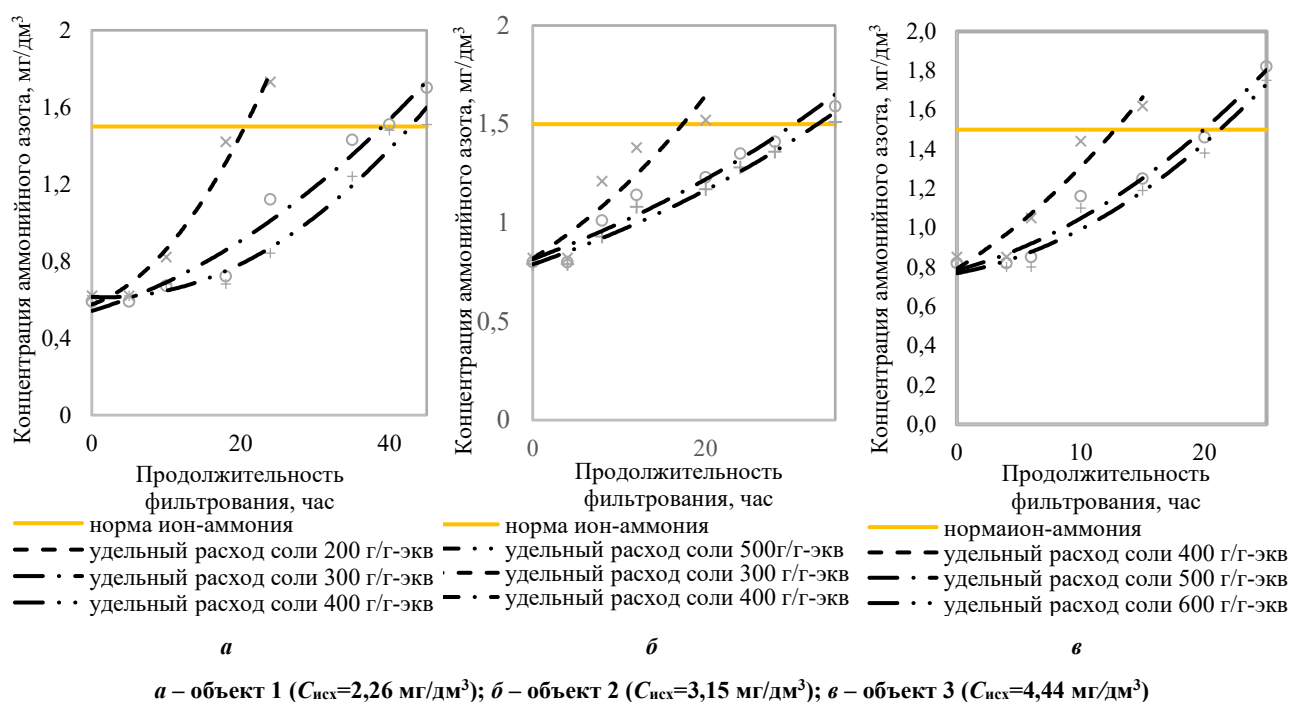


Рисунок 2. – Зависимость продолжительности фильтроцикла от удельного расхода хлористого натрия

Установлено, что для каждого объекта существует оптимальный расход хлористого натрия ( $\text{NaCl}$ ), обеспечивающий максимальную длительность последующего фильтроцикла:

- для объекта 1 ( $C_{исх}=2,26 \text{ мг/дм}^3$ ) оптимальный расход составил  $300 \text{ г/г-экв}$ ;
- для объекта 2 ( $C_{исх}=3,15 \text{ мг/дм}^3$ ) –  $400 \text{ г/г-экв}$ ;
- для объекта 3 ( $C_{исх}=4,44 \text{ мг/дм}^3$ ) –  $500 \text{ г/г-экв}$ .

Дальнейшее увеличение расхода  $\text{NaCl}$  сверх указанных значений приводило к незначительному приросту длительности цикла (менее 10%) при существенном росте затрат, что подтверждает действие принципа убывающей отдачи: увеличение расхода  $\text{NaCl}$  сверх оптимального даёт незначительный прирост длительности цикла при существенном росте затрат.

Сравнение удельного расхода  $\text{NaCl}$  с рабочей обменной емкостью по ион-аммоний выявило отсутствие прямой корреляции: близкие  $E_p$  требуют принципиально разных расходов  $\text{NaCl}$ . Это доказывает, что ключевым фактором, определяющим расход соли, является сложный состав исходной воды: ионы, присутствующие в воде, конкурируют с  $\text{NH}_4^+$  за места сорбции на цеолите и требуют вытеснения при регенерации. Селективность природных цеолитов к катионам обычно убывает в последовательности [9]:  $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ . Данная последовательность хорошо известна для природных клиноптилолитов и объясняет рост необходимого расхода соли при увеличении концентрации конкурирующих катионов. Чем выше концентрация этих ионов в воде, тем больше  $\text{NaCl}$  требуется для эффективной регенерации загрузки. Кроме того, сказывается влияние специфических загрязнителей (органического железа и высокой перманганатной окисляемости), которые засоряют поры цеолита и блокируют активные центры, затрудняя регенерацию и требуя повышенного расхода  $\text{NaCl}$ .

Необходимое количество  $\text{NaCl } P_c$ , кг, на одну регенерацию пилотного фильтра рассчитывалось по формуле<sup>3</sup>:

$$P_c = \frac{f_1 \cdot H_k \cdot E_p \cdot a_c}{1000}, \quad (1)$$

где  $f_1$  – площадь пилотного фильтра, 0,05 м<sup>2</sup>;

$H_k$  – высота слоя загрузки, 0,5 м;

$E_p$  – рабочая обменная емкость катионита, мг-экв/дм<sup>3</sup> (см. таблицу 1);

$a_c$  – удельный расход соли на регенерацию, г/г-экв (варьировалась в диапазоне 100–300 г/г-экв в зависимости от исходного состава воды на объекте).

Удельное количество хлористого натрия ( $\text{NaCl } P_{уд}$ ) (кг/м<sup>3</sup> загрузки) находили делением количества  $\text{NaCl } P_c$  на одну регенерацию пилотного фильтра на объем фильтрующей загрузки (0,025 м<sup>3</sup>).

Удельный расход 8%-го регенерирующего раствора  $\text{NaCl } Q_{уд}$ , м<sup>3</sup>, на 1 м<sup>3</sup> цеолитовой загрузки определяли по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{100 \cdot P_c}{1000 \cdot b \cdot \rho \cdot V_{\phi}}, \quad (2)$$

где  $b$  – концентрация раствора  $\text{NaCl}$ , 8 мас.%;

$\rho$  – плотность 8%-го раствора  $\text{NaCl}$ , принята равной 1,055 т/м<sup>3</sup>;

$V_{\phi}$  – объем фильтрующей загрузки, м<sup>3</sup>.

Результаты для регенерации пилотного фильтра второй ступени с воздушно-водным соотношением 1:1 представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Потребность в реагентах для регенерации цеолитовой загрузки

Удельный расход соли на 1 г-экв рабочей обменной емкости цеолита, г/г-экв	Количество $\text{NaCl } P_c$ , кг, на одну регенерацию цеолитового пилотного фильтра / Удельное количество $\text{NaCl } P_{уд}$ , кг/м <sup>3</sup> , на одну регенерацию 1 м <sup>3</sup> цеолита			Расход $Q_c$ , м <sup>3</sup> , на пилотный фильтр / Удельный расход $Q_{уд}$ , м <sup>3</sup> на 1 м <sup>3</sup> загрузки		
	объекта 1	объекта 2	объекта 3	объекта 1	объекта 2	объекта 3
200	0,45/18,11	–	–	0,006/0,23	–	–
300	0,68/27,16	0,70/27,96	–	0,008/0,34	0,009/0,35	–
400	0,91/36,22	0,93/37,28	0,95/38,02	0,011/0,45	0,012/0,47	0,012/0,48
500	–	1,17/46,60	1,19/47,52	–	0,015/0,58	0,015/0,59
600	–	–	1,43/57,03	–	–	0,018/0,71

*Примечание.* Прочерк (–) означает, что данная комбинация параметров на объекте не исследовалась.

Удельный расход регенерационного раствора в условиях применения вторичной аэрации составил 0,23–0,71 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> загрузки, что в 2–5 раз ниже значений, рекомендуемых производителями цеолита (1,2–1,5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>). Снижение расхода реагента обусловлено тем, что вторичная аэрация способствует доокислению остаточного  $\text{Fe}^{2+}$  и деструкции органожелезистых комплексов, которые в отсутствие аэрации являются основными агентами коагуляции, блокирующими микропоры цеолита [10]. Удаление этих компонентов предотвращает необратимое накопление загрязнителей в поровом пространстве, снижает конкурентное влияние при ионном обмене и позволяет сократить расход реагента без потери эффективности очистки. Важно отметить, что снижение расхода регенерационного раствора не сопровождается деградацией сорбционных свойств цеолита в длительной перспективе.

Восстановление рабочей способности цеолитовой загрузки состоит из трёх этапов: предварительная промывка обратным током воды, собственно регенерация раствором хлористого натрия и отмывка прямым током воды.

Продолжительность регенерации 8%-м раствором  $\text{NaCl}$  принята равной 30–45 мин. в соответствии с рекомендуемыми режимами производителей. Это значение обеспечивает полное вытеснение ионов аммония из цеолитовой загрузки при минимальном расходе реагента и промывных вод, что подтверждено экспериментальными данными по кинетике восстановления обменной емкости.

Таким образом, предложенная методика регенерации обеспечивает эффективное восстановление цеолитовой загрузки, позволяет сократить расход реагентов и продлить ресурс фильтрующего материала.

<sup>3</sup> Проектирование сооружений водоподготовки: пособие к техническому кодексу установившейся практики: П1-2019 к ТКП 45-4.01-320-2018 (33020) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «Стройтехнорм». – Минск, 2020. – 133 с.

**Заключение.** Экспериментально подтверждено, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 перед цеолитовым фильтром позволяет повысить эффективность удаления аммонийного азота и снизить нагрузку на ионообменную загрузку.

1. Установлены значения рабочей обменной емкости цеолита для вод с различным содержанием аммония, составляющие 90,5–105,9 мг-экв/дм<sup>3</sup> при воздушно-водном соотношении более 1:1, что на 41–46% ниже паспортных показателей, определенных производителем на модельных растворах, содержащих только аммоний в дистиллированной воде. Снижение обусловлено конкурентным влиянием сопутствующих загрязнителей (ионов железа, марганца, органических соединений).

2. Определены оптимальные удельные расходы хлористого натрия для регенерации в зависимости от исходной концентрации аммония: 300 г/г-экв при  $C_{\text{исх}} \leq 2,5$  мг/дм<sup>3</sup>, 400 г/г-экв при  $2,5 < C_{\text{исх}} \leq 3,5$  мг/дм<sup>3</sup>, 500 г/г-экв при  $3,5 < C_{\text{исх}} \leq 5,0$  мг/дм<sup>3</sup>.

3. Установлено, что оптимальным воздушно-водным соотношением на стадии вторичной аэрации является 1:1, поскольку дальнейшее увеличение интенсивности аэрации не приводит к значимому приросту эффективности удаления аммонийного азота и экономически нецелесообразно.

4. Показано, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 перед цеолитовым фильтром позволяет существенно снизить удельный расход 8%-го раствора NaCl для регенерации до 0,23–0,71 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> загрузки, что в 2–5 раз ниже типовых рекомендаций производителей цеолита (1,2–1,5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>). Снижение расхода реагента обусловлено уменьшением конкурентного влияния железа, марганца и органических веществ благодаря доокислению и деструкции их комплексов на стадии вторичной аэрации.

Полученные результаты и рекомендации по регенерации цеолитовой загрузки могут быть применены при проектировании и эксплуатации станций водоподготовки малой производительности, использующих двухступенчатые схемы очистки подземных вод сложного состава.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Применение цеолитов клиноптилолитового типа для очистки природных вод [Электронный ресурс] / Н.И. Ватин, В.Н. Чечевичкин, А.В. Чечевичкин и др. // *Magazine of Civil Engineering*. – 2013. – № 2. – С. 81–88. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnih-vod> (дата обращения 24.02.2026).
3. Велюго Е.С., Ющенко В.Д. Влияние степени аэрации воды на удаление железа в напорных фильтрах с песчаной загрузкой и сорбентом АС при обработке воды сложного состава // *Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28 марта 2025 г.* / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А.А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик, С. В. Андреюк. – Брест: БрГТУ, 2025. – С. 26–31.
4. Kordala N., Wyszowski M. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, Iss. 5. – URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069> (дата обращения 24.02.2026).
5. A Study of Using Natural Sorbent to Reduce Iron Cations from Aqueous Solutions / I. Pandova, M. Rimar, A. Panda et al. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2020. – Vol. 17, № 10. DOI: 10.3390/ijerph17103686.
6. Tosun I. Ammonium removal from aqueous solutions by clinoptilolite: determination of isotherm and thermodynamic parameters and comparison of kinetics by the double exponential model and conventional kinetic models // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2012. – № 9(3). – P. 970–984. DOI: 10.3390/ijerph9030970.
7. Investigation of ammonium removal from aqueous solutions by ion exchange using natural and modified clinoptilolite / A.R. Rahmani, A.H. Mahvi, A.R. Mesdaghinia et al. // *Global NEST Journal*. – 2006. – № 8(2). – P. 146–153.
8. Recovery of Ammonium Sulfate Solution by Regeneration of Loaded Clinoptilolite / S. Wasielewski, E. Rott, R. Minke et al. // *Nanomaterials*. – 2022. – № 12(3). DOI: 10.3390/nano12030525.
9. Watanabe Y., Moriyoshi Y. Ammonium ion exchange behaviors on natural clinoptilolites // *Journal of the Society of Inorganic Materials*. – 2003. – № 10(Suppl.). – P. 217–222.
10. Велюго Е.С., Ермак А.А., Ющенко В.Д. Модификация структурных и сорбционных свойств цеолита в процессе удаления ионов аммония и железа из подземных вод // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2025. – № 3. – С. 28–32. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-42-3-28-32.

#### REFERENCES

1. Yushchenko, V., Velyugo, E., & Romanovski, V. (2023). Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations. *Groundwater for Sustainable Development*, 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Vatin, N.I., Chechevichkin, V.N., Chechevichkin, A.V., & Shilova, E.S. (2013). Primenenie tseolitov klinoptilolitovogo tipa dlya ochistki prirodnih vod [Application of clinoptilolite-type zeolites for natural water treatment]. *Magazine of Civil Engineering*, (2), 81–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnih-vod>. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Velyugo, E.S., & Yushchenko, V.D. (2025). Vliyanie stepeni aeratsii vody na udalenie zheleza v napornykh fil'trakh s pesochnoy zagruzkoj i sorbentom AS pri obrabotke vody slozhnoy sostava [Influence of water aeration degree on iron removal in pressure filters with sand and AS sorbent media when treating water of complex composition]. In A.A. Volchek, O.P. Meshik, & S.V. Andreyuk (Eds.) *Inzhenerno-ekologicheskie aspekty i perspektivy razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (26–31). Brest: Brest State Technical University. (In Russ.).

4. Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*, 29(5). URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069>.
5. Pandova, I., Rimar, M., Panda, A., Valicek, J., Kushnierova, M., & Garmicharova, M.A. (2020). A Study of Using Natural Sorbent to Reduce Iron Cations from Aqueous Solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10). DOI: 10.3390/ijerph17103686.
6. Tosun I. (2012). Ammonium removal from aqueous solutions by clinoptilolite: determination of isotherm and thermodynamic parameters and comparison of kinetics by the double exponential model and conventional kinetic models. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 9(3), 970–984. DOI: 10.3390/ijerph9030970.
7. Rahmani, A.R., Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A.R., & Nasser, S. (2006). Investigation of ammonium removal from aqueous solutions by ion exchange using natural and modified clinoptilolite. *Global NEST Journal*, 8(2), 146–153.
8. Wasielewski, S., Rott, E., Minke, R., & Steinmetz, H. (2022). Recovery of Ammonium Sulfate Solution by Regeneration of Loaded Clinoptilolite. *Nanomaterials*, 12(3). DOI: 10.3390/nano12030525.
9. Watanabe, Y., & Moriyoshi, Y. (2003). Ammonium ion exchange behaviors on natural clinoptilolites. *Journal of the Society of Inorganic Materials*, 10(Suppl.), 217–222.
10. Velyugo, E.S., Ermak, A.A., & Yushchenko, V.D. (2025). Modifikatsiya strukturnykh i sorbtsionnykh svoystv tseolita v protsesse udaleniya ionov ammoniya i zheleza iz podzemnykh vod [Modification of structural and sorption properties of zeolite during the removal of ammonium and iron ions from groundwater]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (3), 28–32. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2025-42-3-28-32.

Поступила 20.03.2026

## OPTIMIZATION OF NATURAL ZEOLITE CLINOPTILOLITE REGENERATION IN A TWO-STAGE GROUNDWATER TREATMENT SCHEME

**E. VELYUGO**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article presents the results of experimental studies aimed at determining optimal regeneration parameters of natural clinoptilolite zeolite using a sodium chloride solution. The research was conducted within a two-stage technological scheme for groundwater treatment characterized by elevated concentrations of iron, manganese, ammonium nitrogen, and high permanganate oxidizability. The influence of secondary aeration intensity on the operating exchange capacity of zeolite was established. Optimal specific NaCl consumption rates (300–500 g/g-eq depending on the initial ammonium concentration) were determined, ensuring maximum filter run duration. It was shown that the application of secondary aeration with an air-to-water ratio of 1:1 (by volume) makes it possible to reduce the consumption of regeneration solution by 2–5 times compared to manufacturers' recommendations.*

**Keywords:** *groundwater of complex composition, two-stage water treatment, clinoptilolite, ion exchange, regeneration, ammonium nitrogen, secondary aeration.*