

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СМЯГЧЕНИЯ ЖЕСТКОЙ ВОДЫ

Бута Оралович Хушвактов

Мирзо Улугбек Самаркандский государственный, архитектурно-строительный университет,
старший преподаватель

b.khushvaktov@samdaq.edu.uz

Умида Уткировна Курбанова

Мирзо Улугбек Самаркандский государственный, архитектурно-строительный университет, PhD,
старший преподаватель

kurbanova.umida@samdaq.edu.uz

ARTICLE INFO.

Ключевые слова: жесткость воды, умягчение воды, электродиализ, обратный осмос, ионообмен, реагент, обессоливание, карбонатная и некарбонатная жесткость.

Аннотация

В статье рассмотрены проблемы повышения жесткости подземных вод, актуальные для Узбекистана и других регионов, где подземные источники являются главным ресурсом питьевой воды. Высокая жесткость приводит к образованию накипи, сокращению срока службы оборудования и росту энергозатрат, что требует эффективных методов ее смягчения. Несмотря на широкое применение различных технологий, остаются недостаточно изученными вопросы выбора оптимального метода с учетом экономической целесообразности и технических условий. Исследования проводились методом лабораторного эксперимента с модельной водой различной жесткости. Сравнивались термические и реагентные методы умягчения воды. Было выявлено, что известковый метод с дозировкой CaO 1,04 г/л снижает жесткость с 39,5 до 19,5 мг-экв/л, а известково-содовый метод с добавлением соды — до 15,5 мг-экв/л. Термический метод полностью удаляет растворенные соли, однако характеризуется высокими энергетическими затратами (217,77 кВт·ч/м³). Ионообменный метод и мембранные технологии также эффективны, но требуют значительных капитальных затрат и регулярного обслуживания. В результате исследований установлено, что наиболее экономически выгодными и эффективными являются реагентные методы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем водоподготовки и выборе технологий смягчения воды в бытовых и промышленных условиях с учетом специфики подземных источников Узбекистана.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/> © 2025 LWAB.

Введение

Недавние исследования освещают проблемы и решения для обеспечения качественной питьевой водой, особенно в регионах, зависящих от источников подземных вод. Подземные воды часто

содержат высокие уровни минералов жесткости, железа и марганца, что требует очистки для безопасного потребления [1]. Традиционные методы умягчения могут производить значительные отходы, в то время как химическое умягчение в осветлителях является сложным и редко применяется [2]. Инновационные подходы включают динамические системы умягчения, которые обеспечивают высокую производительность и минимальные отходы [2], и магнитную очистку воды, которая может улучшить качество воды и уровень pH [3]. Мембранные технологии, в частности нанофильтрация, показали себя многообещающими в снижении эксплуатационных расходов и улучшении качества воды, даже превосходя традиционные методы в некоторых случаях [4]. Эти достижения удовлетворяют острую потребность в эффективных и устойчивых решениях по очистке воды, особенно в таких регионах, как Узбекистан, где высок уровень использования подземных вод, а жесткость воды создает значительные проблемы. В связи с этим важнейшей задачей становится внедрение эффективных технологий умягчения воды для бытового и промышленного применения.

Химические методы умягчения воды широко используются в водоподготовке для снижения жесткости и декарбонизации воды, особенно в промышленных применениях [5]. Хотя фундаментальная химия остается неизменной на протяжении столетия, технологические достижения повысили эффективность за счет использования пластинчатых блоков, флокулянтов и рециркуляции ила [4]. Для очистки питьевой воды химическое умягчение менее распространено из-за необходимости использования специализированных реагентов и получения щелочной воды [5]. Однако последние разработки в области конструкций реакторов, таких как вихревые реакторы и реакторы с псевдоожиженным слоем, увеличили производительность и снизили сложность эксплуатации [4]. Эти современные реакторы позволяют достигать высокой удельной производительности 50-100 м³/(м²·ч) и исключать жидкие сбросы, оставляя только твердые отходы, пригодные для утилизации [5]. В сочетании с другими технологиями, например, обратным осмосом, эти методы позволяют эффективно очищать воду сложного состава, в том числе с высоким содержанием сульфатов и низкой щелочностью [5].

В этом сборнике статей рассматриваются различные методы умягчения воды и их применение. Реагентные методы, включая известковую и известково-содовую обработку, широко используются для снижения жесткости воды и декарбонизации. Эффективность этих методов, наряду с термическим умягчением, можно оценить с помощью лабораторных экспериментов, включающих точное дозирование реагентов и измерение остаточной жесткости [6]. Последние разработки в области технологии умягчения воды включают использование пластинчатых блоков, флокулянтов и рециркуляции шлама для повышения эффективности. Для косметической промышленности сочетание реагентных технологий с методами ионного обмена может производить глубоко опресненную воду [7]. Выбор метода умягчения зависит от различных факторов, включая характеристики источника воды и желаемые результаты [8]. Разработан алгоритм, помогающий выбрать наиболее подходящий метод смягчения на основе конкретных параметров и целей обработки [6]. Такой подход позволил получить надежные сравнительные данные по эффективности и экономической оправданности методов применительно к конкретным параметрам жесткости воды.

Предварительный анализ показал, что реагентные методы, особенно известково-содовый и фосфатный, наиболее эффективны и экономически выгодны в условиях Узбекистана, обеспечивая снижение жесткости воды с первоначальных значений до уровня ниже 15,5 мг-экв/л. Термический метод, несмотря на способность полностью удалять растворенные соли, оказался энергоемким (217,77 кВт·ч/м³), что ограничивает его применение в основном промышленной сферой. Полученные результаты имеют важное прикладное значение и могут быть использованы при выборе оптимальных технологий смягчения воды, обеспечивая снижение эксплуатационных расходов, увеличение срока службы оборудования и повышение

экологической устойчивости как в бытовом, так и в промышленном секторе.

Методы умягчения воды

Методология данного исследования включала комплекс лабораторных экспериментов, направленных на сравнительный анализ эффективности методов умягчения жесткой воды. Для проведения испытаний была подготовлена модельная вода с различными уровнями исходной жесткости от 22,5 до 44,5 мг-экв/л, отражающими типичные характеристики подземных вод Узбекистана. В экспериментах применялись реагентные методы: известковый (с использованием CaO в дозировке 1,04 г/л), известково-содовый (CaO 0,97 г/л с добавлением соды Na₂CO₃ 2,5 г/л) и метод фосфатирования (Na₃PO₄ 1,85 г/л). Параллельно проводился эксперимент по термическому умягчению, при котором вода подвергалась нагреву до выпадения солей в осадок с последующим механическим удалением. Жесткость воды измерялась до и после обработки с помощью химических титриметрических методов, что позволяло объективно сравнивать эффективность каждого способа. Дополнительно проводилась оценка энергозатрат при термическом методе путем расчета потребляемой электроэнергии на единицу объема обработанной воды. Для обеспечения достоверности результатов все измерения повторялись трижды, а итоговые данные представляли собой средние арифметические значения. Полученные показатели жесткости и затраченных ресурсов были сведены в сводные таблицы и графически отображены для наглядности сравнения эффективности методов. Данный подход позволил выделить наиболее подходящие и экономически оправданные технологии умягчения воды для условий Узбекистана и аналогичных регионов с высоким содержанием кальция и магния в подземных источниках.

Результаты исследований

В ходе лабораторных исследований были протестированы различные методы умягчения воды. Экспериментальные данные представлены в таблице и на рисунке 1 :

Метод умягчения	Применяемые реагенты	Исходная жёсткость (мг-экв/л)	Жёсткость после обработки (мг-экв/л)
Известковый метод	CaO 1,04 г/л	39,5	19,5
Известково-содовый метод	CaO 0,97 г/л + Na ₂ CO ₃ 2,5 г/л	44,5	15,5
Фосфатирование	Na ₃ PO ₄ 1,85 г/л	22,5	6
Термический метод	Нагрев воды	-	Полное удаление растворенных солей

Термический метод, несмотря на его высокую эффективность, требует значительных энергетических затрат – порядка 217,77 кВт·ч на 1 м³ воды. Поэтому его применение целесообразно только в промышленных условиях.

Ионообменный метод и мембранные технологии также показывают хорошие результаты, но требуют значительных капитальных затрат и регулярного обслуживания оборудования.

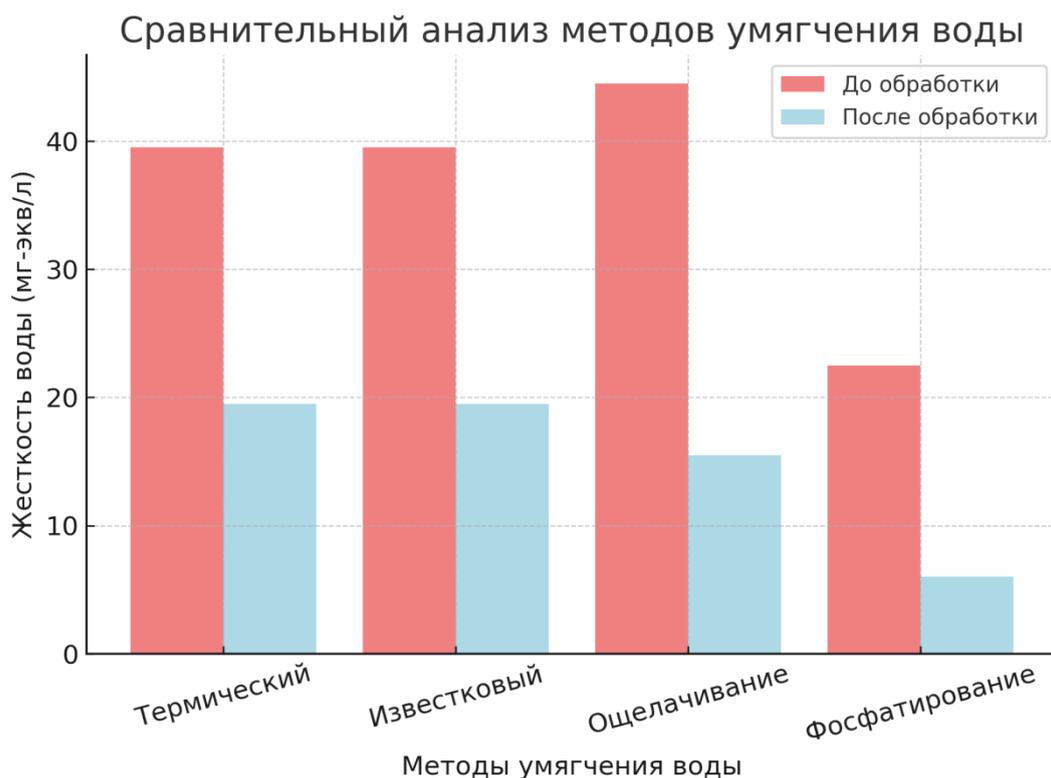


Рис 1 Сравнение методов умягчения воды

Проведенные лабораторные исследования подтвердили высокую эффективность реагентных и термического методов смягчения жесткой воды. Наибольшее снижение жесткости было достигнуто фосфатированием, которое снизило показатель с 22,5 мг-экв/л до 6 мг-экв/л. Известково-содовый метод также продемонстрировал значительное уменьшение жесткости с 44,5 до 15,5 мг-экв/л. Однако чисто известковый способ, при меньших затратах на реагенты, показал менее выраженное снижение жесткости (с 39,5 до 19,5 мг-экв/л). В то же время, термический метод продемонстрировал возможность полного устранения растворенных солей, однако его применение существенно ограничено высокой энергоёмкостью, требующей затрат 217,77 кВт·ч на 1 м³ воды, что делает его целесообразным лишь на крупных промышленных объектах.

В ходе проведения исследований была выявлена необходимость более детального изучения вопросов, связанных с устойчивостью применения реагентных технологий в долгосрочной перспективе. Несмотря на очевидную экономичность реагентных методов, остается недостаточно изученным влияние образующихся осадков на окружающую среду и способы их утилизации или повторного использования. Это открывает дополнительное направление исследований, направленное на разработку экологически безопасных технологий управления отходами при смягчении воды.

Для повышения надежности выводов рекомендуется дополнительно провести полевые испытания на реальных подземных водах с различными концентрациями ионов кальция и магния, а также долговременные мониторинговые исследования состояния ионообменных и мембранных систем, с целью сравнительной оценки экономической целесообразности данных методов для условий Узбекистана. Полученные результаты имеют практическое значение для водоснабжения и энергетики, поскольку правильный выбор технологии умягчения воды позволит снизить эксплуатационные затраты на обслуживание инженерного оборудования, увеличить срок службы систем теплообмена и улучшить качество воды для бытовых и производственных нужд.

Таким образом, представленная методология и результаты исследования обеспечивают научную основу для внедрения оптимальных технологий в практику, учитывая специфику химического состава и экономические условия региона.

Заключение

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Реагентные методы (известковый, известково-содовый и фосфатирование) являются наиболее экономически выгодными и эффективными для бытового и промышленного использования.
2. Мембранные технологии и ионообменные методы обеспечивают высокую степень очистки, но требуют значительных затрат на оборудование и обслуживание.
3. Термическое умягчение является эффективным, но энергоёмким методом, который применим в основном на промышленных объектах.
4. Выбор конкретного метода зависит от исходной жёсткости воды, технических условий и экономической целесообразности.

В результате проведённых исследований установлено, что наиболее эффективными и экономически целесообразными для смягчения жесткой воды в условиях Узбекистана являются реагентные методы, в частности, известково-содовый и фосфатирование. Известково-содовый метод позволил снизить жесткость воды с 44,5 до 15,5 мг-экв/л, а фосфатирование продемонстрировало максимальную эффективность, сократив жесткость с 22,5 до 6 мг-экв/л. Термическое умягчение полностью удаляет растворённые соли, однако требует значительных энергозатрат, что ограничивает его применение только промышленными условиями с достаточной энергетической базой. Результаты данного исследования имеют практическое значение для оптимизации технологий водоподготовки, повышения срока службы теплообменного оборудования и снижения эксплуатационных расходов на очистку воды. Тем не менее, выявлена необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на изучение экологического воздействия образующихся осадков при применении реагентных методов, а также на разработку методов их безопасной утилизации или повторного использования. Перспективным также является изучение долгосрочных экономических и экологических последствий внедрения мембранных и ионообменных технологий в условиях регионов Центральной Азии, включая Узбекистан.

Литература

1. “Подготовка питьевой воды из скважин с высоким содержанием железа и марганца | Вестник Инженерной школы ДВФУ.” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://journals.dvfu.ru/vis/article/view/1314>
2. “Разработка динамической системы умягчения воды – ДСУ - Водоснабжение и санитарная техника Журнал.” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.vstnews.ru/ru/archives-all/2021/2021-06/8314-razrabotka-dinamicheskoy>
3. А. Д. Мехтиев, Т. С. Герасименко, and Е. Ж. Сарсикеев, “РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОСТИ И PH- ФАКТОРА ВОДОПРОВОДНОЙ ВОДЫ ГОРОДА АСТАНА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЕ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ: накипь; жесткость воды; системы очистки воды; электромагнитная очистка.” *Her. Sci. SSeifullin Kazakh Agrotech. Univ. Multidiscip.*, no. 4(115), Art. no. 4(115), Dec. 2022, doi: 10.51452/kazatu.2022.4.1254.
4. “Водоснабжение и санитарная техника Журнал.” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://vstmag.ru/ru/archives-all/2020/2020-1/7894-puti-snizheniya>

5. A. Pervov and K. Tikhonov, “Очистка бытовых сточных вод обратным осмосом: Domestic wastewater treatment by reverse osmosis,” *Vodosnabzhenie Sanit. Teh.*, no. 5, May 2020, doi: 10.35776/MNP.2020.05.06.
6. “Analysis of water softening methods and an algorithm of choosing the best method for using in production cycle - IOPscience.” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/839/4/042065>
7. “ПОМ’ЯКШЕННЯ ВОДИ В ПРОЦЕСАХ ВОДОПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВ КОСМЕТИЧНИХ ЗАСОБІВ | Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ‘Екологія. Людина. Суспільство.’” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ecoconference.kpi.ua/article/view/291013>
8. “АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ - МИНКИНА - Градостроительство и архитектура.” Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/83466>