

УДК 628.1

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-4-77-87

© Р. А. Гурдин, аспирант

© R. A. Gurdin, post-graduate student

© А. Н. Беляев, канд. техн. наук, доцент

© A. N. Belyaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Е. В. Куц, канд. техн. наук, доцент

© E. V. Kuts, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© В. В. Шабалин, д-р биол. наук, доцент

© V. V. Shabalin, Dr. Sci. Bio., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru, belyaev71@list.ru,

E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru, belyaev71@list.ru,

kouts@yandex.ru, vvshabalin@mail.ru

kouts@yandex.ru, vvshabalin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ АРТЕЗИАНСКОЙ ВОДЫ ОТ БОРА

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF METHODS OF PURIFYING ARTESIAN WATER FROM BORON

Проведены эксперименты по снижению концентрации бора в питьевой воде из артезианской скважины в микрорайоне Нововятск города Киров. Представлены результаты анализа различных методов снижения концентрации бора, таких как коагуляция, применение химических реагентов (гипохлорит натрия, соляная кислота, перекись водорода), электрокоагуляция и адсорбция. Добавление гипохлорита натрия оказалось наиболее эффективным методом, что позволило снизить концентрацию бора на 98,30 %. Продемонстрирована эффективность методов в сочетании с перемешиванием и аэрацией воздухом.

Ключевые слова: очистка воды, бор, электрокоагуляция, коагуляция.

There were carried out experiments aimed at reducing the concentration of boron in the drinking water from the artesian well in the Novovyatsk micro-district of the city of Kirov. The results of the analysis of various boron concentration reduction methods, such as cacoagulation, the use of chemicals (sodium hypochlorite, hydrochloric acid, hydrogen peroxide), electro-coagulation and adsorption, are presented. The addition of sodium hypochlorite has turned out to be the most effective method, which reduces the concentration of boron by 98.30 %. There has been demonstrated the effectiveness of the methods in combination with mixing and aeration with air.

Keywords: water purification, boron, electro-coagulation, coagulation.

Введение

В связи с непрерывным ростом использования артезианских подземных вод для хозяйственно-питьевых нужд возникает проблема их водоподготовки. Бор является одним из наиболее сложных веществ для удаления из воды, поэтому его присутствие в питьевой воде требует комплексного подхода в исследованиях.

Бор является биологически активным химическим элементом и, согласно принятой классификации¹, относится к группе второго класса опасности. Продолжительное употребление питьевой воды с повышенным содержанием бора может вызвать острую

¹ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

почечную недостаточность, гипотензию и нарушение минерального обмена в организме человека [1–2]. Нормативно-правовые акты^{2,3} определяют предельно допустимые концентрации бора в воде питьевого качества. Согласно Руководству по обеспечению качества питьевой воды Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)², содержание бора в питьевой воде не должно превышать 2,4 мг/л, а в Директиве Европейского парламента и Совета Европейского союза 2020/2184 от 16 декабря 2020 года³ установлено значение до 1,5 мг/л. Однако в России¹ установлено более строгое ограничение концентрации бора — до 0,5 мг/л.

Во многих регионах России, таких как Южный Урал, Западная Сибирь, Центральный район, концентрации бора в артезианских водах часто превышают предельно допустимые значения в 6–10 раз [1]. Поэтому разработка эффективных технологий очистки артезианских вод от бора, обеспечивающих их безопасность для потребления, является актуальной задачей.

Для решения этой проблемы разработаны различные технологии и процессы, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения.

Наибольшее распространение на практике получили методы коагуляции, химического осаждения, электрокоагуляции и адсорбции.

Коагуляция и флокуляция представляют собой методы, которые используются для удаления бора реже, в сравнении с другими методами, по причине их сравнительно низкой эффективности [3, 4]. Основным недостатком данных процессов заключается в низкой селективности по отношению к бору. Они более эффективны в отношении других загрязнений, таких как взвешенные части-

цы и коллоидные вещества [4, 5]. Чтобы добиться существенного результата, коагуляцию и флокуляцию необходимо объединять с другими методами, что приводит к увеличению себестоимости технологии [6].

Химическое осаждение — это процесс, при котором образуются нерастворимые вещества под воздействием специфических реагентов [5, 7]. Такие вещества, как соли кальция или магния, используются для осаждения бора из воды в виде нерастворимого соединения [8]. Однако этот процесс требует тщательного контроля химического состава воды, включая уровень pH и концентрацию осаждающих веществ [7, 9]. Если концентрация бора низкая, процесс может быть малоэффективен, а используемые химические реагенты могут привести к вторичному загрязнению воды.

Электрокоагуляция — это метод очистки воды от загрязняющих веществ путем пропускания ее через электролизер с растворимыми алюминиевыми или железными анодами, служащими для получения ионов металлов, выступающих в роли коагулянтов [10]. В результате взаимодействия ионы металлов вступают в реакцию с гидроксид-ионами, что приводит к образованию комплексов гидроксидов металлов и осаждению.

Ионы металлов взаимодействуют с бором, образуя более крупные соединения, которые можно легко отделить с помощью процессов осаждения или фильтрации. Электрокоагуляция оказывается весьма эффективной для удаления бора, особенно при использовании в сочетании с другими методами [10]. Заметным преимуществом этого метода, в сравнении с традиционной химической коагуляцией, является получение значительно меньшего количества осадка.

Одним из основных недостатков данного процесса является образование пассивного слоя на электродах, что может снизить эффективность и потребовать частого технического обслуживания [11]. Также могут быть

² Руководство по обеспечению качества питьевой воды: 4-е изд. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2017. 628 с.

³ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2020/2184 от 16 декабря 2020 года о качестве воды, предназначенной для употребления людьми (в новой ред.). 62 с.

значительными затраты энергии, связанные с электрокоагуляцией. Во время процесса может образовываться осадок, который требует утилизации.

Метод адсорбции, использующий химические добавки, такие как известь, активированный оксид алюминия или модифицированный диоксид кремния, может быть эффективным для удаления бора из воды [12]. Однако адсорбенты имеют ограниченную емкость, поэтому требуется их своевременная утилизация или регенерация. Кроме того, эффективность адсорбции сильно зависит от уровня pH воды [13].

Таким образом, каждый метод удаления бора из воды имеет свои недостатки и ограничения, которые необходимо учитывать. Выбор метода зависит от таких факторов, как концентрация бора, наличие других загрязняющих веществ, эксплуатационные расходы и воздействие на окружающую среду. Однако ни один метод не является универсальным во всех ситуациях.

Материалы и методы

В период с апреля по ноябрь 2023 года проводились исследования различных методов снижения концентрации бора в воде, поступающей из артезианской скважины в микрорайоне Нововятск города Кирова.

Экспериментально исследовались следующие методы: коагуляция с использованием коагулянтов на основе алюминия; химическое осаждение; электрокоагуляция с применением алюминиевых электродов; адсорбция. Методы были выбраны по причине их экономической привлекательности и доступности.

Исходная вода, отобранная из артезианской скважины для экспериментов, отличалась повышенным содержанием бора, что делало ее непригодной для употребления без предварительной обработки. Физико-химические характеристики исходной воды представлены в табл. 1.

Концентрация бора в воде измерялась спектрофотометром ПЭ-5400 ВИ в соответствии с п. 5 методики⁴, что позволило обеспечить высокую точность результатов.

Исследование метода коагуляции проводилось на основе жидкого коагулянта на основе алюминия марки Aquatics, характеристики которого представлены в табл. 2.

Коагулянт вводился в воду в различных дозировках, варьирующихся от 1 до 10 мл/л, и тщательно перемешивался в течение 30 мин с использованием магнитной ме-

⁴ ГОСТ 31870–2012. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии.

Таблица 1

Основные физико-химические характеристики исходной воды из артезианской скважины в микрорайоне Нововятск г. Кирова

№ п/п	Определяемые показатели	Единицы измерения	Результаты испытаний	Величина допустимого уровня	НД на методы исследований
1	Запах при 20 °С	Балл	0	Не более 0	ГОСТ Р 57164–2016
2	Запах	Балл	0	Не более 1	ГОСТ Р 57164–2016
3	Привкус	Балл	0	Не более 0	ГОСТ Р 57164–2016
4	Бор	мг/дм³	От 1,64 до 4,9	Не более 1	ГОСТ 31870–2012, п. 5
5	Жесткость	мг-экв./дм ³	0,62±0,09	Не более 7	ГОСТ 31954–2012, метод А
6	Мутность	ЕМФ	Менее 1	Не более 1	ГОСТ Р 57164–2016
7	Сухой остаток	мг/дм ³	327,4±7,1	В пределах 50–1000	ГОСТ 18164–72
8	Перманганатная окисляемость	мг О ₂ /дм ³	Менее 0,8	Не более 3	ГОСТ 23268.12–78
9	Цветность	Градус цветности	1,1±0,3	Не более 5 (градус)	ГОСТ 31868–2012, метод Б

Характеристики коагулянта Aquatics

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Прозрачная или слегка мутноватая желтоватая жидкость
Массовая доля ионов алюминия, %, не менее	4
Массовая доля хлоридов, %, не менее	10
Показатель активности водородных ионов (рН) средства, единицы рН, не менее	1,5
Плотность при 20 °С, г/см ³ , не менее	1,185
Массовая доля триоксида алюминия (Al ₂ O ₃), %, не менее	7,6

шалки INTLLAB MS-500, обеспечивающей равномерное распределение реагента. Для усиления процесса коагуляции применялась воздушная аэрация с помощью компрессора Laguna 2500A. Далее производилось отстаивание воды в течение 1 ч с последующим определением концентрации бора.

Для повышения эффективности процесса удаления бора методом коагуляции в воду добавлялись химические реагенты, такие как соляная кислота (35 %), перекись водорода (35 %) и гипохлорит натрия (концентрация активного хлора 130 г/л). Эти вещества вводились до коагуляции, что позволило изменить рН среды и создать более благоприятные условия для осаждения бора. В частности, соляная кислота использовалась для снижения рН до оптимальных значений (рН = 6–7), при которых бор более эффективно коагулируется. Перекись водорода и гипохлорит натрия выступали в качестве окислителей, способствующих разрушению сложных органических соединений, которые могли связывать бор и препятствовать его удалению.

В экспериментах по очистке методом электрокоагуляции использовалась установка, оснащенная алюминиевыми электродами размером 500×40×4 мм (рис. 1). Расстояние между пластинами составляло 9 мм (рис. 1, в), что создавало оптимальные условия для электрического взаимодействия и формирования коагуляционных осадков. В процессе экспериментов сила тока варьи-

ровалась в диапазоне от 400 до 1600 мА, что позволило оценить воздействие тока на эффективность процесса удаления бора. Эксперименты продолжались в течение 60 мин, после чего проводился анализ воды и образовавшегося осадка. Метод электрокоагуляции сочетался с добавлением гипохлорита натрия с целью оценки возможных синергетических эффектов.

Принципиальная схема работы установки электрокоагуляции представлена на рис. 2.

В процессе электрокоагуляции образовывались хлопья осадка, внешний вид которых представлен на рис. 3.

В экспериментах снижения концентрации бора с помощью электрокоагуляции также оценивалось комбинированное применение фильтрации через активированный уголь и аэрации воды.

Для исследования адсорбции использовалась известь и порошок алюминия. Известь добавлялась с целью доведения рН воды до 11. Порошок алюминия использовался в качестве флокулянта для увеличения размеров осаждаемых частиц. Его внешний вид представлен на рис. 4.

Обсуждение и результаты

С помощью коагуляции удалось добиться снижения концентрации бора на 46 % от первоначальной (эксперимент № 1, опыт 4, от 06.04.2023) (рис. 5, а). Исследовалось дополнительное физическое воздействие: перемешивание и воздушная аэрация (экспе-



Рис. 1. Габаритные размеры алюминиевого электрода: *a* — длина; *б* — ширина; *в* — толщина алюминиевой шины и расстояние между электродами

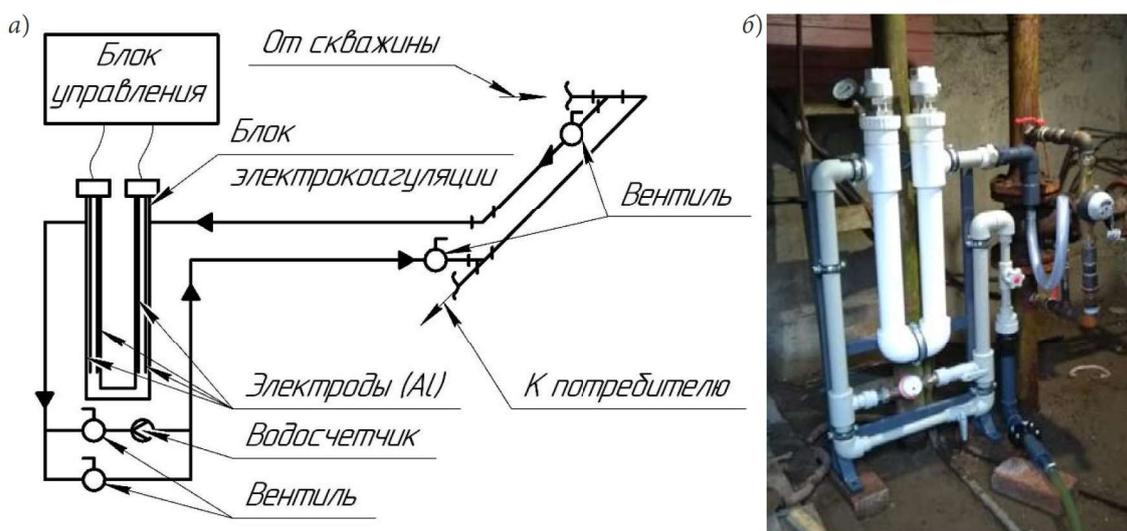


Рис. 2. Принципиальная схема установки электрокоагуляции: *a* — блок электрокоагуляции; *б* — фото установки



Рис. 3. Внешний вид образовавшихся хлопьев



Рис. 4. Внешний вид порошка алюминия

римент № 3 от 19.04.2023). Благодаря этому удалось снизить концентрацию бора до 45 % от первоначальной (рис. 5, в).

Наибольшее снижение концентрации бора наблюдалось при использовании 5 мл/л коагулянта, достигая 54 % (см. рис. 5, а). Однако в экспериментах № 2 и 4 (рис. 5, б, з)

с этой же дозировкой процент снижения оказался отрицательным, то есть концентрация бора возросла, что может указывать на неоднородность реакции или на разрушение образовавшихся флоккул.

Увеличение концентрации подаваемого коагулянта приводит к снижению содержа-

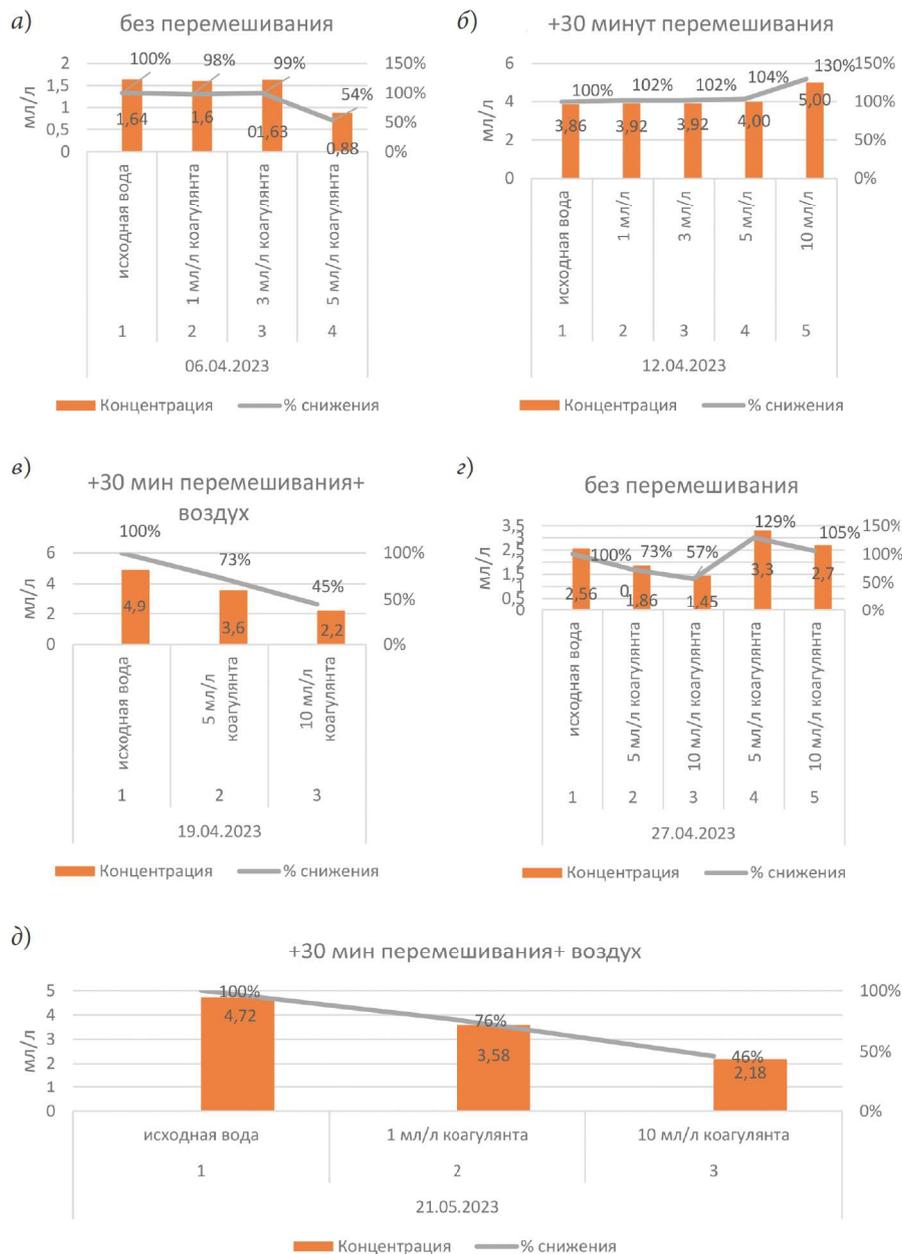


Рис. 5. Результаты исследований снижения концентрации бора при различных дозировках коагулянта и физических воздействиях: а — без перемешивания; б — с перемешиванием в течение 30 мин; в — с перемешиванием в течение 30 мин и подачей воздуха; з — влияние изменения дозировки коагулянта без физического воздействия; д — влияние изменения дозировки коагулянта с перемешиванием в течение 30 мин и подачей воздуха

ния бора в воде (рис. 5, а, д). Использование воздушной аэрации совместно с перемешиванием привело к уменьшению этого положительного эффекта (для 5 мл/л коагулянта концентрация бора снизилась на 46 % без перемешивания (рис. 5, а) и на 26,53 % с перемешиванием и аэрацией (рис. 5, в)). Увеличение количества коагулянта до 10 мл/л привело к кратному снижению концентрации бора (рис. 5, в, г, д).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что использование коагулянта является эффективным методом снижения концентрации бора в питьевой воде. Сочетание с длительными физическими воздействиями привело к снижению эффективности коагулянта по причине разрушения образовавшихся флоккул.

Согласно результатам исследования применения химических реагентов (рис. 6), значительный эффект снижения концентрации бора был достигнут при добавлении гипохлорита натрия. Этот эксперимент показал снижение концентрации бора до 0,05 мг/л, что составляет 98 % от первоначальной.

Добавление соляной кислоты и перекиси водорода также привело к снижению концентрации бора (на 3,40 и 35,03 % соответственно), однако эти показатели ниже, чем при использовании гипохлорита натрия.

Так как добавление гипохлорита натрия показало значительное снижение концентрации бора в питьевой воде, были проведены дополнительные исследования с варьированием количества этого реагента (рис. 7). При увеличении дозировки хлора наблюдалось увеличение процента снижения концентрации бора. Например, при добавлении 0,3 мл/л хлора (эксперимент № 4) процент снижения составил 71. Однако при последующем увеличении количества гипохлорита натрия наблюдался некоторый откат (эксперимент № 5).

Исследование метода электрокоагуляции (рис. 8) проводилось с использованием алюминиевых электродов и варьируемой силы тока.

Электрокоагуляция при 400 мА (эксперимент № 2) показала снижение концентрации бора на 6,25 % (до 4,5 мг/л). Увеличение силы тока до 800 мА (эксперимент № 3) улучшило результат до 10,42 % (4,3 мг/л). Однако дальнейшее увеличение тока до 1600 мА (эксперимент № 4) не дало дополнительного эффекта по сравнению с 800 мА, и снижение концентрации бора осталось на уровне 10,42 %.

При комбинировании метода электрокоагуляции и добавления гипохлорита натрия (1 мл/л) результаты были неоднозначны.

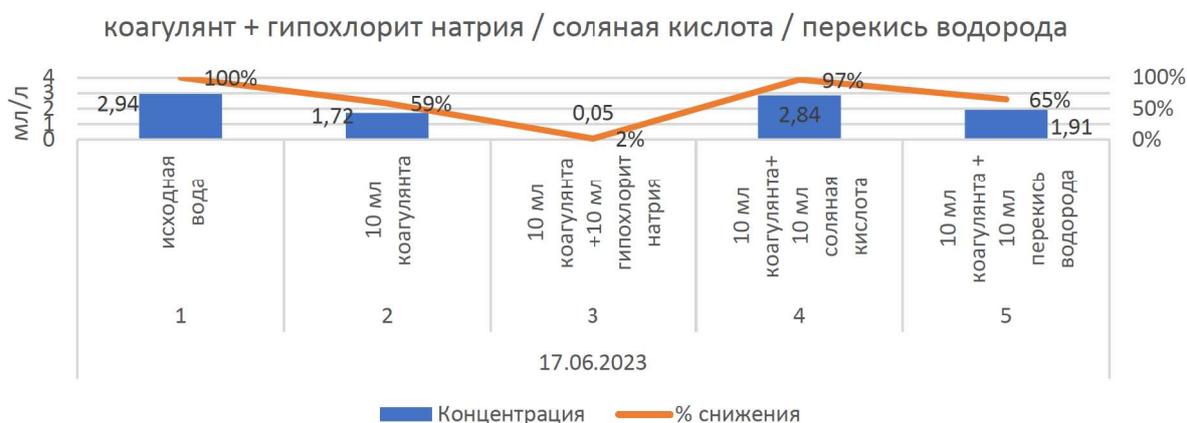


Рис. 6. Результаты исследования снижения концентрации бора с помощью коагуляции с добавлением химических реагентов

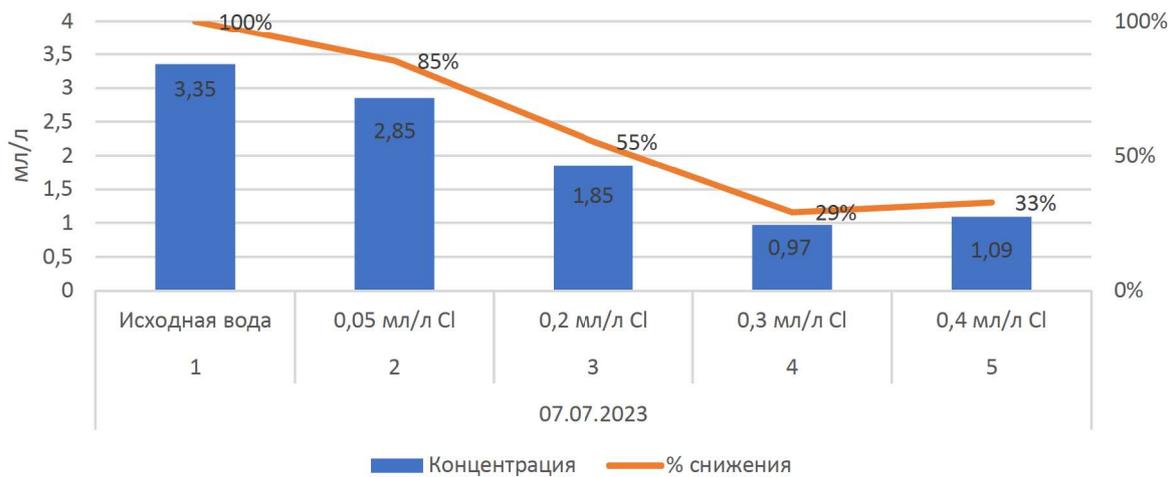


Рис. 7. Результаты исследований снижения концентрации бора с добавлением различного количества гипохлорита натрия

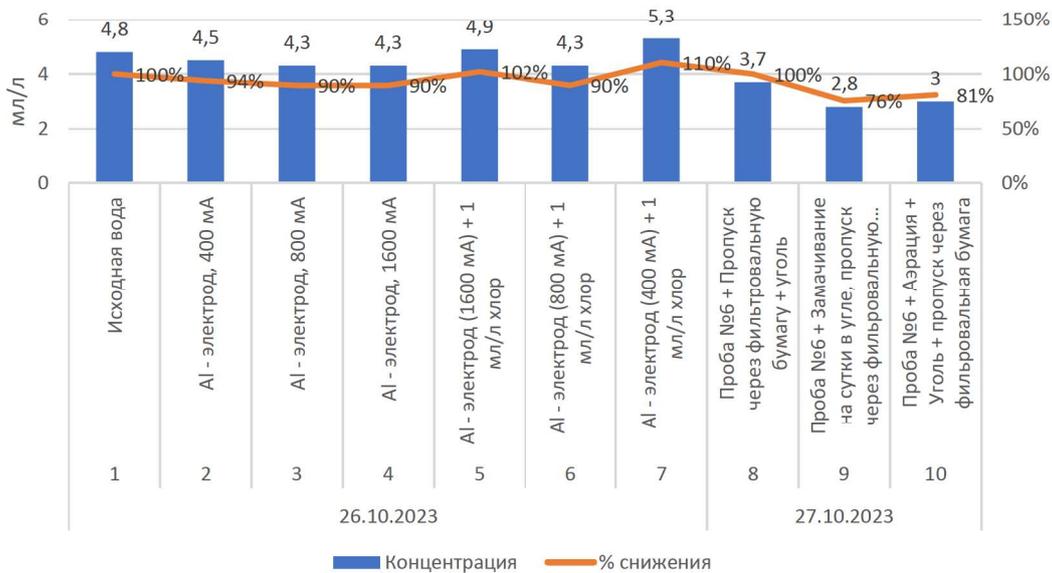


Рис. 8. Результаты исследований снижения концентрации бора в воде с помощью метода электрокоагуляции

При токе 1600 мА (эксперимент № 5) наблюдалось увеличение концентрации бора до 4,9 мг/л, что указывает на отрицательный эффект, с изменением на $-2,08\%$. При токе 800 мА (эксперимент № 6) концентрация бора уменьшилась до 4,3 мг/л (снижение на $10,42\%$), что показывает эффективность такой комбинации. При токе 400 мА (эксперимент № 7) снижение концентрации бора составило $-10,42\%$, что также свидетельствует

о недостаточной эффективности этого сочетания.

Дополнительная обработка комбинации веществ эксперимента № 6 показала значительное улучшение результатов. Пропуск через фильтровальную бумагу с угольной засыпкой (эксперимент № 8) снизил концентрацию бора до 3,7 мг/л (снижение на $13,95\%$). Добавление активированного угля на сутки в комбинацию для эксперимента № 6 и после-

дующая фильтрация (эксперимент № 9) дали наиболее значительное снижение концентрации бора — до 2,8 мг/л (снижение на 34,88 %). Дополнительная аэрация (эксперимент № 10) также продемонстрировала эффективность, снизив концентрацию бора до 3,0 мг/л (снижение на 30,23 %).

Эксперименты показали, что электрокоагуляция при силе тока 800 мА в сочетании с добавлением гипохлорита натрия и последующей фильтрацией через активированный уголь может являться эффективным методом для снижения концентрации бора в воде.

Влияние адсорбентов (известь, угольный фильтр, порошок алюминия) на снижение концентрации бора в воде представлено на рис. 9.

Исходная вода (эксперимент № 1) имела рН 8,6 и концентрацию бора 4,7 мг/л (базовое значение для сравнения). Добавление извести (эксперимент № 2) способствовало увеличению рН воды до 11,1 и снижению концентрации бора до 3,8 мг/л, что соответствует снижению на 19,15 %. Таким образом, известь способна эффективно снижать концентрацию бора за счет повышения рН, что также благоприятствует процессу коагуляции и осаждению бора.

Использование угольного фильтра (эксперимент № 3) также при рН 11,1 снизило кон-

центрацию бора до 3,2 мг/л, что эквивалентно снижению на 31,91 %. Угольный фильтр оказался более эффективным, чем известь, за счет большей удельной поверхности.

Применение порошка алюминия (эксперимент № 4) при том же уровне рН 11,1 дало снижение концентрации бора до 2,9 мг/л, что соответствует снижению на 38,30 %. Порошок алюминия показал наибольшую эффективность среди всех исследованных добавок в связи с его высокой способностью к коагуляции и осаждению бора в виде нерастворимых соединений.

Результаты проведенных экспериментов с адсорбентами показали, что все исследованные добавки (известь, угольный фильтр и порошок алюминия) эффективно снижают концентрацию бора в воде, особенно при повышении рН до щелочных значений. Порошок алюминия оказался самым эффективным средством, снижая концентрацию бора на 38,30 %, что свидетельствует о его потенциале как эффективного коагулянта в процессах очистки воды.

Выводы

Целью исследования был поиск наилучшего метода снижения концентрации бора в воде, добываемой из артезианской скважины в микрорайоне Нововятск города Кирова. Основные методы включали коагуляцию,



Рис. 9. Результаты исследований влияния адсорбентов на снижение концентрации бора



Рис. 10. Результаты исследований методов снижения концентрации бора

добавление химических реагентов, электрокоагуляцию, а также адсорбцию.

Наилучшие результаты исследования методов снижения концентрации бора представлены на рис. 10.

Исследования показали, что наиболее эффективные методы снижения концентрации бора в воде включают использование гипохлорита натрия и комбинацию процессов электрокоагуляции и фильтрации. Для обеспечения стабильных результатов очистки воды от бора необходима дальнейшая оптимизация условий обработки и долгосрочные исследования влияния различных методов и добавок на процесс.

Библиографический список

1. Алексеев Л. С., Ивлева Г. А., Аль-Амри З. Очистка подземных вод питьевого назначения от бора // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 312–315.
2. Орлянская Т. И. Бор в питьевой воде. Влияние на организм человека. URL: <https://morgau.cap.ru/news/2023/05/22/bor-v-pitjevoj-vode-vliyanie-na-organizm-cheloveka>
3. Nielsen V. G., Goff T., Hunsaker B. D., Neves C. D. The Gilded Clot: Review of Metal-Modulated Platelet Activation, Coagulation, and Fibrinolysis // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24 (4). 3302.
4. Dlamini N. G., Basson A. K., Pullabhotla V. S. R. Optimization and Application of Biofloculant Passivated Copper Nanoparticles in the Wastewater Treatment // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16 (12). 2185.
5. Акимов И. И., Хохлова Е. Ф. Очистка сточных вод от меди методом реагентного осаждения // Сб. науч. тр. Национальной науч.-техн. конф. 2024. № 1. С. 21–23.

6. Кузин Е. Н., Кручинина Н. Е. Оценка эффективности использования комплексных коагулянтов в процессах очистки сточных вод машиностроительного производства // Известия вузов. Сер. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62, № 10. С. 140–146.

7. Liu X., Xu C., Chen P., Li K., Zhou Q., Ye M., Zhang L., Lu Y. Advances in Technologies for Boron Removal from Water: A Comprehensive Review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19 (17). 10671.

8. Бусарев А. В., Шешегова И. Г. Очистка природных вод от борат-ионов с применением ионного обмена // Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63). С. 52–60.

9. Фролова С. Р., Кузин Е. Н., Кручинина Н. Е., Азопков С. В. Оценка эффективности очистки пластовых вод электрокоагуляцией // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34, № 11 (234). С. 106–108.

10. da Silva D. M. L., Carneiro M. T. W. D., Ribeiro J. Boron Removal from Mining and Synthetic Effluents by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes // The Scientific World Journal. 2019. May 9. Pp. 163–175.

11. Ingelsson M., Yasri N., Roberts E. P. L. Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation — a review // Water Research. 2020. Vol. 187. 116433.

12. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects // Chemical Reviews. 2022. Vol. 122 (24). Pp. 17647–17695.

13. Wolska M., Kabsch-Korbutowicz M., Rosińska A., Solipiwo-Pieścik A., Urbańska-Kozłowska H. The Use of Microfiltration for the Pretreatment of Backwash Water from Sand Filters // Materials. 2024. Vol. 17 (12). 2819.

References

1. Alekseev L. S., Ivleva G. A., Al'-Amri Z. *Ochistka podzemnykh vod pit'evogo naznacheniya ot bora* [Purification of drinking water from boron]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 8, pp. 312–315.

2. Orlyankova T. I. *Bor v pit'evoy vode. Vliyanie na organizm cheloveka* [Boron in drinking water. Effects on the human body]. Available at: <https://morgau.cap.ru/news/2023/05/22/bor-v-pitjevoj-vode-vliyanie-na-organizm-cheloveka>
3. Nielsen V. G., Goff T., Hunsaker B. D., Neves C. D. The Gilded Clot: Review of Metal-Modulated Platelet Activation, Coagulation, and Fibrinolysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24 (4), 3302.
4. Dlamini N. G., Basson A. K., Pullabhotla V. S. R. Optimization and Application of Biofloculant Passivated Copper Nanoparticles in the Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16 (12), 2185.
5. Akimov I. I., Khokhlova E. F. *Ochistka stochnykh vod ot medi metodom reagentnogo osazhdeniya* [Treatment of wastewater from copper by reagent precipitation]. *Trudy Natsional'noy nauch.-tekhn. konf. – Proceedings of the National Scientific and Technical Conference*, 2024, no. 1, pp. 21–23.
6. Kuzin E. N., Kruchinina N. E. *Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya kompleksnykh koagulyantov v protsessakh ochistki stochnykh vod mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Assessment of the effectiveness of the use of complex coagulants in the processes of wastewater treatment of machine-building production]. *Izvestiya vuzov. Ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Proceedings of universities. Ser.: Chemistry and chemical technology*, 2019, vol. 62, no. 10, pp. 140–146.
7. Liu X., Xu C., Chen P., Li K., Zhou Q., Ye M., Zhang L., Lu Y. Advances in Technologies for Boron Removal from Water: A Comprehensive Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (17), 10671.
8. Busarev A. V., Sheshegova I. G. *Ochistka prirodnykh vod ot borat-ionov s primeneniem ionnogo obmena* [Purification of natural waters from borate ions using ion exchange]. *Izvestiya KGASU – Proceedings of KGASU*, 2023, no. 1 (63), pp. 52–60.
9. Frolova S. R., Kuzin E. N., Kruchinina N. E., Azopkov S. V. *Otsenka effektivnosti ochistki plastovnykh vod elektrokoagulyatsiy* [Evaluation of the efficiency of formation water treatment by electro-coagulation]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Advancements in chemistry and chemical technology*, 2020, vol. 34, no. 11 (234), pp. 106–108.
10. da Silva D. M. L., Carneiro M. T. W. D., Ribeiro J. Boron Removal from Mining and Synthetic Effluents by Electro-coagulation Using Aluminum Electrodes. *Scientific World Journal*, May 9, 2019, pp. 163–175.
11. Ingelsson M., Yasri N., Roberts E. P. L. Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electro-coagulation — a review. *Water Research*, 2020, vol. 187, 116433.
12. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*, 2022, vol. 122 (24), pp. 17647–17695.
13. Wolska M., Kabsch-Korbutowicz M., Rosińska A., Solipiwo-Pieścik A., Urbańska-Kozłowska H. The Use of Microfiltration for the Pretreatment of Backwash Water from Sand Filters. *Materials*, 2024, vol. 17 (12), 2819.