

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ ВОДЫ

Беляев А. Н., Дегтерев Б. И., Куц Е. В.

IMPROVING EFFICIENCY OF SILICA REMOVAL FROM WATER USING MAGNESIUM OXIDE

Belyaev A. N., Degterev B. I., Kuts E. V.

Аннотация

Одной из проблем, препятствующих широкомасштабному использованию подземных водоисточников как для питьевого водоснабжения, так и для нужд промышленных потребителей является частая необходимость обескремнивания воды. Определенное несовершенство используемых методов делает актуальным поиск путей модернизации существующих технологий обескремнивания, повышения эффективности реагентных процессов в применяемых технологиях. Целью настоящей работы является интенсификация процесса магнезиального обескремнивания воды подземных источников путем дополнительного воздействия на нее гидродинамической кавитацией в реакторе проточного типа. Для оценки степени влияния кавитационной составляющей в процессе магнезиального обескремнивания воды была проведена серия натурных экспериментов. Кавитационная обработка воды проводилась в циклическом режиме, количество циклов от 1 до 30. Выявлена зависимость скорости обескремнивания воды от температуры, градиент которой уменьшается с ростом количества циклов кавитационной обработки потока. Определены области температурной и кавитационной составляющих процесса обескремнивания. Установлено, что скорость магнезиального обескремнивания воды с дополнительной кавитационной ее обработкой увеличивается на 17,1 %. Результаты работы могут быть полезны специалистам в области водоподготовки объектов теплоэнергетики, предприятий химико-фармацевтической и целлюлозно-бумажной промышленности, питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: водоподготовка, обескремнивание воды, гидродинамическая кавитация.

Введение

Практические аспекты интеграции прикладной науки и современных химических технологий все чаще находятся в плоскости интенсификации существующих методов и процессов. Ранее уже затрагивалась тема повышения эффективности реагентных процессов гидродинамической кавитационной обработкой и были рассмотрены перспективы развития данного на-

Abstract

Frequent need for silica removal from water represents one of the issues preventing large-scale use of underground water sources both for drinking water supply and to satisfy the needs of industrial consumers. Definite imperfection of the methods used calls for ways to upgrade the existing technologies of silica removal from water, and improve efficiency of reagent treatment related to the technologies used. The purpose of the present study is to intensify the process of silica removal from water of underground sources using magnesium oxide by additional exposure to hydrodynamic cavitation in a flow-type reactor. To assess the impact of the cavitation component in the process of silica removal from water using magnesium oxide, a series of field experiments was carried out. Cavitation water treatment was performed in a cyclic mode, with the number of cycles from 1 to 30. A dependence between the silica removal rate and temperature, the gradient of which decreases with increasing number of cavitation flow treatment cycles, is revealed. Areas of temperature and cavitation components of the silica removal process are determined. It is established that the rate of silica removal from water using magnesium oxide with additional cavitation treatment increases by 17.1%. The results of the study can be useful for specialists in the field of water treatment at thermal power facilities, chemical and pharmaceutical as well as pulp and paper enterprises, and for drinking water supply.

Keywords: water treatment, silica removal from water, hydrodynamic cavitation.

правления в промышленных технологиях обескремнивания воды [4, 13].

Актуальность данной тематики подчеркивается отсутствием широко внедренных промышленных технологий, направленных на селективное удаление соединений кремния из питьевой воды [2, 18]. Реализованные же технологии приводят к снижению концентрации в воде кремниевых соединений только, как правило, в качестве

дополнительного эффекта при обезжелезивании-деманганации или при обесфторивании воды [11, 18]. При необходимости работать только по кремнию промышленные технологии ограничены чаще всего использованием дорогих ионообменных или обратноосмотических процессов [5, 19], ведущих к значительному удорожанию обработки воды, а также приводящих к существенному изменению ее химического состава. Это накладывает значимые ограничения, связанные с использованием воды в таких отраслях как теплоэнергетика (при питании котлов высокого и сверхвысокого давления), химико-фармацевтическая и целлюлозно-бумажная промышленность [9, 18, 20].

Отдельной проблемой стоит использование подземных водоисточников с повышенным содержанием кремния для питьевого водоснабжения. В соответствии с требованиями СанПиН 2.1.4.1074–01 [7] допустимая концентрация активированной кремнекислоты (по кремнию) в питьевой воде составляет 10 мг/дм³; класс опасности вещества второй по санитарно-токсикологическому показателю вредности. Однако в значительном количестве регионов России наблюдается существенное превышение нормативов по кремнию: от 3,2 ПДК в Волго-Камском и Печорском регионах до 30 ПДК в Восточно-Предкавказском регионе [5]. По статистике министерства природных ресурсов и экологии РФ воду из указанных артезианских бассейнов используют от 10 до 20 % населения России. Состояние здоровья населения напрямую зависит от состава и качества питьевой воды. Избыток кремния в воде способен вызвать появление мочекаменной болезни (камни в почках) [17], а также формирование таких аномалий в организме, как атеросклероз, воспаление и фиброз печени, поджелудочной железы, почки и других органов брюшной полости, фиброз легочной ткани [8]. Кремний в состоянии спровоцировать онкозаболевания, ишемическую болезнь сердца (особенно при высокой жесткости воды) [15], инфаркт миокарда [16].

Чаще всего появление кремния в воде объясняется факторами природного характера, климатическими и гидрогеологическими особенностями регионов, при которых формируются благоприятные условия для химического растворения водовмещающих пород, содержащих кремний.

Переход двуокиси кремния в раствор происходит благодаря наличию в нем необходимого количества уголекислоты [14]. Как правило, такой природный раствор представляет собой смесь димера $\text{Si}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (до 50 %), ортокремниевой кислоты H_4SiO_4 , незначительных долей ионизированных форм (HSiO_3^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, $\text{H}_3\text{Si}_2\text{O}_7^-$) и коллоидов $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ [2].

Методы и материалы

Для снижения содержания кремния в природной воде перспективами промышленной реализации обладают сорбционные методы, в которых используют коагулянты: известь, гидроксиды и оксиды железа, алюминия, магния. В водной среде при определенных условиях данные соединения способны сорбировать на своей поверхности кремниевую кислоту, в результате чего образуются труднорастворимые силикаты. Механизм отложения ортокремниевой кислоты на поверхности нерастворимых гидроксидов металлов состоит в следующем [1]. Мономер H_4SiO_4 при соответствующем значении pH среды конденсируется на любой уже имеющейся твердой поверхности, несущей гидроксильные группы, какими могут быть силанольные группы или любые поверхностные группы –ОН. Процесс молекулярного осаждения кремнезема из раствора мономера H_4SiO_4 включает в себя реакцию конденсации, катализируемую гидроксил-ионами (что возможно при $\text{pH} > 7$, но не более $\text{pH} 11$, когда кремнезем растворяется с образованием силикат-иона) и ускоряемую присутствием солей. При повышении температуры осаждение протекает быстрее, а конденсация и дегидратация более полно. Механизм осаждения коллоидных частиц кремнекислоты при наличии в воде незначительных концентраций многозарядных ионов металлов во многом определяется присутствием потенциального агента их коагуляции. Основными факторами, определяющими возможность осаждения коллоидных частиц на твердой поверхности, являются состав присутствующих в растворе солей и его pH [21]. Процесс значительно ускоряется, когда совместно с коллоидами осаждается растворимая кремнекислота, способствующая их связыванию и укрупнению [1]. Сорбционные методы наиболее просты и отработаны. Однако основной проблемой, ограничивающей их промышленное использование, является необходи-

мость тонкой регулировки параметров технологического процесса и подогрева водной среды. Для эффективной обработки температура воды должна быть не менее 40 °С [5, 18], что достаточно затратно при больших расходах.

Экспериментальными исследованиями, проведенными ранее [4], уже была подтверждена возможность интенсификации процесса магнезиального обескремнивания воды путем воздействия на водную среду кавитационного поля гидродинамического проточного реактора [3]. Полученный эффект обоснован значительным увеличением температурного градиента в локальных микрообъемах жидкости, возникающего при аннигиляции парогазовых каверн в условиях жесткой кавитации. Экстремальные параметры на единичном участке гидродинамической системы могут доходить до критических значений порядка 2000 °С и сопровождаться появлением импульсных давлений до 1500 МПа [4]. Причиной этому является жесткое воздействие на обрабатываемую среду кумулятивных струй при схлопывании кавитационных каверн с возникновением высокоамплитудных сдвиговых и ударных нагрузок. Наблюдаемые эффекты от такого воздействия: деформация поверхностей, прилегающих к зоне кавитации, электрические разряды, ионизация частиц, разрыв химических связей [12].

Лабораторные исследования [4] позволили установить определяющую роль кавитационных явлений при интенсификации протекания реагентных процессов по их количественным и качественным показателям в комплексной обработке воды с участием гидродинамической кавитации (ГДК). В частности, для технологии обескремнивания воды оксидом магния с дополнительной кавитационной обработкой водного раствора происходит увеличение в 1,7 раза динамической составляющей протекания реакционных процессов. Следует отметить, что здесь наличие интенсивной кавитационной обработки является обязательным условием для достижения необходимого эффекта за малый промежуток времени [6].

Задачи настоящей работы:

- прогноз характера изменения содержания кремния при различных температурах обработки

воды оксидом марганца в зависимости от длительности контакта с реагентом;

- выявление зависимости скорости магнезиального обескремнивания воды от температуры среды;
- оценка роли гидродинамической кавитации при обработке воды;
- оценка влияния температурной составляющей на результат обработки воды.

Для оценки степени влияния кавитационной составляющей на процесс магнезиального обескремнивания воды в реальных условиях был проведен ряд экспериментов с водой действующего подземного водозабора в г. Глазове (Удмуртия). Концентрация кремния $C(\text{Si})$ в течение всего периода работ не выходила за рамки $17 \div 18 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$. Содержание кремния в воде определяли фотометрическим методом в соответствии с РД 52.24.433–2005. Содержание других веществ не превышало установленных гигиенических нормативов для питьевой воды.

После перемешивания с оксидом магния вода из смесительной емкости направлялась на кавитационную обработку. Кавитационное поле формировалось в реакторе проточного типа [3] с рабочей камерой прямоугольного сечения, в которой располагался вертикальный цилиндрический возбудитель кавитации. Скорость обрабатываемой воды в рабочей камере реактора поддерживалась в интервале 19–28 м/с.

После кавитационного реактора вода направлялась обратно в смесительную емкость, откуда вновь в реактор. Тем самым обеспечивалась возможность многократного воздействия кавитации на процесс обескремнивания. Максимальное количество циклов кавитационной обработки воды составило 30.

Отбор проб, их обработка и анализ проводился специалистами МУП «Водоканал» г. Глазова по стандартным методикам.

Результаты исследования и обсуждение

Обзор сведений по использованию технологии магнезиальной обработки воды из источников [4, 11] и РД 34.37.513 [10] позволил спрогнозировать характер влияния температуры раствора T и времени t , в течение которого осуществлялся контакт с реагентом, на интенсивность декремнизации воды. Содержание магния в растворе, согласно рекомендациям РД 34.37.513, предусмат-

ривалось на уровне 5–7 мг на 1 мг концентрации кремния $C(\text{Si})$, что соответствовало концентрации магния в растворе, равной $100 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

Рис. 1 иллюстрирует характер изменения концентрации кремния во времени его контакта с реагентом при названных выше условиях. Начальная концентрация кремния $C(\text{Si}) = 17,9 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$. Анализируя полученные тренды, можно констатировать, что подогрев обрабатываемой воды до $40 \text{ }^\circ\text{C}$ способствует увеличению эффективности обескремнивания, вплоть до достижения уровня ПДК = $10 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$. Дальнейшее увеличение температуры (с 40 до $95 \text{ }^\circ\text{C}$) малоэффективно. Пунктирная линия тренда построена по данным работы [11], где опыты проводились при повышенном давлении и температуре $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основная часть работы была посвящена экспериментам по оценке влияния температуры воды T на динамику и скорость декремнизации dC/dt . В качестве обескремнивающего агента использовался оксид магния с концентрацией по магнию $C(\text{Mg}) 100$ и $250 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

На рис. 2 приведены графические результаты экспериментов. С достоверностью аппроксимации не менее 72 % изменение скорости обескремнивания воды может быть описано логарифмическими зависимостями, представленными на иллюстрации. Рост скорости обескремнивания замедляется с увеличением температуры, что вполне согласуется с приведенными выше данными.

Налицо положительный эффект от повышения концентрации MgO , причем он имеет двойкий

характер. Во-первых, в условиях эксперимента при увеличении $C(\text{Mg})$ до $250 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ при рекомендованной РД 34.37.513 температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость обескремнивания увеличивается более чем на 33 % (на $2,8 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$). Во-вторых, требуемую эффективность обескремнивания можно достичь при меньшей температуре: $30 \text{ }^\circ\text{C}$ против $40 \text{ }^\circ\text{C}$ по типовой технологии. Впоследствии это может сыграть важную роль при экономическом обосновании внедрения предлагаемой авторами технологии.

Замена в традиционной схеме обескремнивания, предлагаемой РД 34.37.513, подогревателя жидкости на проточный кавитационный реактор [3] дает возможность оценить вклад гидродинамической кавитации в эффективность обработки воды. Опыты проводились циклично, что позволило установить влияние кавитации на скорость уменьшения концентрации $C(\text{Si})$ пошагово, от цикла к циклу.

На процесс обескремнивания воды оказывает влияние изменение градиента ее температуры (см. рис. 1 и 2). Для кавитационного реактора, использовавшегося в настоящей работе, зависимость удельной скорости подъема температуры воды от длительности ее кавитационной обработки t установлена в работе [4]. Математически это описывается уравнением $dT/dt = -0,23t + 5,4, \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{ч}^{-1}$. Данная информация послужила основанием для определения температурной составляющей и оценки ее влияния на итоговый результат обработки воды.

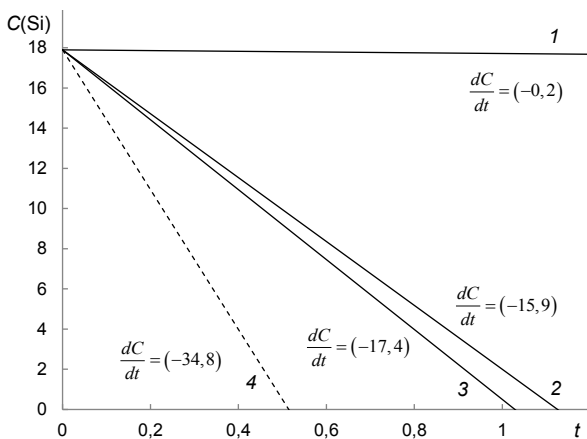


Рис. 1. Изменение концентрации кремния $C(\text{Si})$, $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$, при $C(\text{Mg})=100 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$, в зависимости от длительности контакта с реагентом t , ч; значения температуры реагентной среды T : тренд 1– $15 \text{ }^\circ\text{C}$, тренд 2– $40 \text{ }^\circ\text{C}$, тренд 3– $95 \text{ }^\circ\text{C}$, тренд 4– $120 \text{ }^\circ\text{C}$

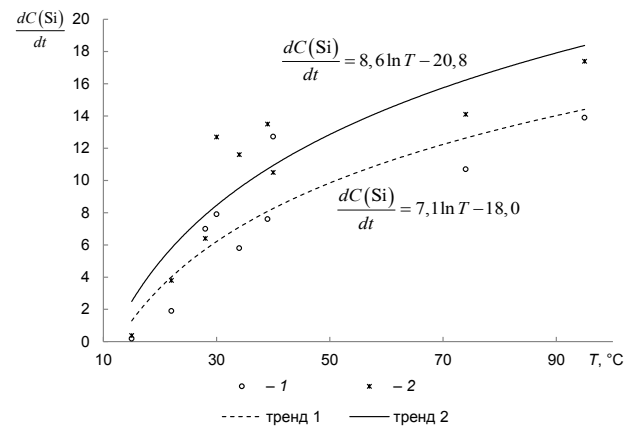


Рис. 2. Зависимость скорости магниального обескремнивания воды dC/dt , $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$, от температуры T , $^\circ\text{C}$, для концентраций MgO : тренд 1– $100 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; тренд 2– $250 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$

На рис. 3 представлены полученные опытным путем данные, характеризующие зависимость изменения во времени содержания кремния в воде dC/dt от числа циклов кавитационной обработки воды n . При отсутствии кавитации уменьшение содержания кремния в воде происходит на более низком уровне, о чем можно судить по пунктирным линиям тренда на этом же рисунке.

В итоге авторам удалось установить зоны температурной $dC(t)_T$ и кавитационной $dC(t)_K$ составляющих процесса декремнизации воды при многоциклической ее обработке:

$$\{dC(t)_T\} \leq 0,4n - 1,4; \quad (1)$$

$$\{dC(t)_K\} \leq 0,4n - 0,1. \quad (2)$$

Область $dC(t)_T$ лежит внутри области $dC(t)_K$ (рис. 4). Динамика изменения скорости снижения концентрации $C(\text{Si})$ при кавитационной обработке среды может быть численно определена как разница между границами данных областей:

$$\Delta(dC(\text{Si})/dt) = \{dC(t)_K\} - \{dC(t)_T\}. \quad (3)$$

График изменения скорости снижения концентрации кремния с оценкой погрешности результатов для $C(\text{Mg}) = 100 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ представлен сверху на рис. 4.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности существенно повысить интенсивность магнезиального обескремнивания воды дополнительным воздействием на нее гидродинамической кавитацией, способствующей значительному росту скорости декремнизации воды.

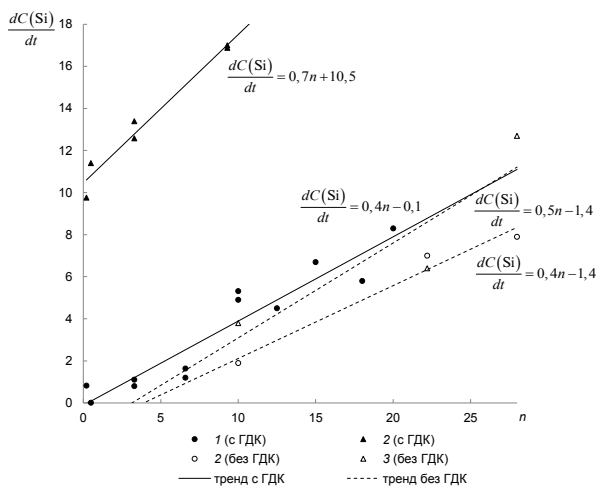


Рис. 3. Изменение содержания кремния $dC(\text{Si})/dt$, $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$, от числа циклов обработки n при концентрационном содержании в воде оксида магния: 1–500 $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; 2–100 $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; 3–250 $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе установлено, что в технологиях магнезиального обескремнивания воды с целью интенсификации процесса и повышения его эффективности перспективным является использование гидродинамической кавитации.

Скорость декремнизации воды, подверженной воздействию эффектов гидродинамической кавитации, при типовых для традиционных технологий концентрациях магния возрастает в среднем до 17,1 %. Вклад кавитационной составляющей при этом растет по мере увеличения количества циклов обработки.

Повышение температуры обрабатываемой воды способствует росту интенсивности обескремнивания. Известно также, что кавитационные процессы сопровождаются локальным нагревом жидкости, который усиливается при многократном их повторении, то есть в нашем случае с увеличением количества циклов кавитационного воздействия возрастает температурная составляющая процесса, что влечет за собой увеличение скорости снижения концентрации $C(\text{Si})$. Данный эффект и эффект возрастания кавитационной составляющей $dC(t)_K$ с ростом количества циклов обработки увеличивают общую эффективность процесса обескремнивания.

Поскольку в процессе кавитационной обработки воды имеет место и рост ее температуры, очевидна перспективность совершенствования технологий обескремнивания воды в направлении повышения их энергоэффективности. Исследования должны включать и поиск путей

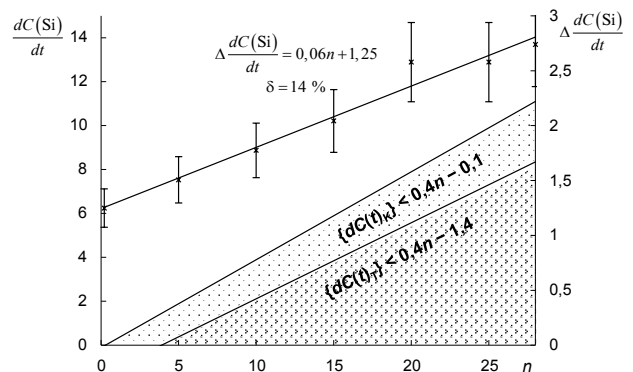


Рис. 4. Зависимость роста скорости процесса обескремнивания воды, $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$, от числа циклов n кавитационной обработки

совершенствования кавитационных реакторов с целью снижения количества циклов кавитационной обработки воды при неизменном конечном результате.

Натурные испытания инновационных решений являются следующим этапом данной работы, который готовится к реализации после разработки и создания опытной линии обескремнивания воды подземного водозабора г. Глазова производительностью $15 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$.

Литература

1. Айлер, Р. (1982). Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия. М.: Мир, 416 с.
2. Алексеев, В. С., Тесля, В. Г. и Болдырев, К. А. (2011). О необходимости пересмотра нормативного содержания кремния в питьевой воде. Водоснабжение и санитарная техника, № 5, сс. 56–60.
3. Беляев, А. Н. и Флегентов, И. В. (2012). Способ обеззараживания воды синергетическим воздействием. Патент № 2445272.
4. Беляев, А. Н. и Флегентов, И. В. (2014). Гидродинамическая кавитационная обработка как инструмент интенсификации реагентных процессов в промышленных технологиях. Журнал прикладной химии, т. 87, № 8, сс. 1092–1100.
5. Беляев, А. Н., Флегентов, И. В., Лысов, Д. С., Костарев, В. В., Банаев, Д. Е. и Лутава, О. А. (2015). Кавитационная интенсификация процесса магнезиального обескремнивания при водоподготовке. Вода: химия и экология, № 12, сс. 25–30.
6. Гимранов, Ф. М., Беляев, А. Н., Флегентов, И. В., Вахрушева, О. М. и Лысов, Д. С. (2016). Актуализация вопроса обескремнивания подземных водоисточников для г. Кирова и перспективные направления его решения. Вестник Казанского технологического университета, т. 19, № 6, сс. 141–144.
7. Главный государственный санитарный врач РФ (2002). СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав России, 90 с.
8. Горбунов, А. В., Ляпунов, С. М., Окина, О. И. и Серегина, И. Ф. (2012). Роль питьевой воды в обеспечении организма человека микроэлементами. Экология человека, № 2, сс. 3–8.
9. Гурвич, С. М. и Кострикин, Ю. М. (1974). Оператор водоподготовки. М.: Энергия, 359 с.
10. Заместитель начальника Союзглавэнерго (1961). СО 34.37.513 (РД 34.37.513). Руководящие указания по магнезиальному обескремниванию воды. М.: Госэнергоиздат, 100 с.
11. Клячко, В. А. и Кастальский, А. А. (1950). Очистка воды для промышленного водоснабжения. М.: Стройиздат, 336 с.
12. Кнепп, Р., Дейли, Дж. и Хеммит, Ф. (1974). Кавитация. М.: Мир, 688 с.
13. Лысов, Д. С., Беляев, А. Н. и Флегентов, И. В. (2015). Оценка перспектив использования гидродинамической кавитации в технологии магнезиального обескремнивания воды.

В: Всероссийская ежегодная НПК «Общество, наука, инновации». Киров: ВятГУ, сс. 378–379.

14. Питьева, К. Е. (1988). Гидрогеохимия (учебное пособие для вузов по специальности «Гидрогеология и инженерная геология»), 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 315 с.
15. Пригун, И. В. и Краснов, М. С. (2009). Технологии очистки воды от кремния. Проблемы и особенности. В: Материалы III научно-практической конференции «Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования». М.: Траверс, часть 1, сс. 70–81.
16. Степанов, Р. В. (1992). Материалы к изучению причинно-следственных связей инфаркта миокарда с водным фактором. Канд. мед. наук. Казанский медицинский институт.
17. Сусликов, В. Л. (1979). К гигиенической оценке роли кремния в питьевой воде. Гигиена и санитария, № 7, сс. 101–103.
18. Фесенко, Л. Н., Федотов, Р. В. и Игнатенко, С. И. (2012). Обескремнивание питьевой воды фильтрованием через модифицированную загрузку. Водоснабжение и санитарная техника, № 11, сс. 20–29.
19. Фрог, Б. Н. и Левченко, А. П. (1996). Водоподготовка. М.: МГУ, 680 с.
20. Шифрин, С. М. и Дмитриев, В. Д. (1981). Справочник по эксплуатации систем водоснабжения, канализации и газоснабжения. Л.: Стройиздат, 271 с.
21. Bergna, H. and Roberta, W. (2006). Colloidal silica. Fundamentals and applications. New York: CRC/Taylor & Francis, 912 p.

References

1. Iler, R. (1982). *Khimiya kremnezyoma: rastvorimost, polimerizatsiya, kolloidnye i poverkhnostnye svoystva, biokhimiya [The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica]*. Moscow: Mir, 416 p. (in Russian).
2. Alekseev, V. S., Tesla, V. G. and Boldyrev, K. A. (2011). O neobkhodimosti peresmotra normativnogo soderzhaniya kremniya v pitevoy vode [About necessity of revision of standard silicon content in potable water]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 5, pp. 56–60 (in Russian).
3. Belyaev, A. N. and Flegentov, I. V. (2012). *Sposob obezrazhivaniya vody sinergeticheskim vozdeystviyem [Method of decontaminating water with synergetic action]*. Patent No. 2445272 (in Russian).
4. Belyaev, A. N. and Flegentov, I. V. (2014). *Gidrodinamicheskaya kavitatsionnaya obrabotka kak instrument intensivatsii reagentnykh processov v promyshlennykh tekhnologiyakh [Hydrodynamic cavitation treatment as a tool for intensification of reagent processes in commercial technologies]*. *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 87, No. 8, pp. 1092–1100 (in Russian).
5. Belyaev, A. N., Flegentov, I. V., Lysov, D. S., Kostarev, V. V., Banaev, D. E., Lutavaia, O. A. (2014). *Kavitatsionnaya intensivatsiya protsessa magnezialnogo obeskremnivaniya pri vodopodgotovke [Cavitational intensification of magnesia desilicization in water treatment]*. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 12, pp. 25–30 (in Russian).
6. Gimranov, F. M., Belyaev, A. N., Flegentov, I. V., Vahrusheva, O. M. and Lysov, D. S. (2016). *Aktualizatsiya voprosa obeskremnivaniya podzemnykh vodoistochnikov dlya g. Kirova i perspektivnye napravleniya ego resheniya*

[Foregrounding the issue of silica removal from underground water sources in Kirov and promising directions of its solution]. *Herald of Kazan Technological University*, vol. 19, No. 6, pp. 141–144 (in Russian).

7. Chief Public Health Officer of the Russian Federation (2002). *SanPiN 2.1.4.1074-01. Pitevaya voda. Gigienicheskiye trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem vodosnabzheniya. Kontrol kachestva [Sanitary Regulations SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized water supply systems. Quality control]*. Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation, 90 p. (in Russian).

8. Gorbunov, A. V., Lyapunov, S. M., Okina, O. I. and Seregina, I. F. (2012). Rol pitevoy vody v obespechenii organizma cheloveka mikroelementami [Estimation of drinking water role in microelements supply of human body]. *Human Ecology*, No. 2, pp. 3–8 (in Russian).

9. Gurvich, S. M. and Kostrikin, Yu. M. (1974). *Operator vodopodgotovki [Water treatment operator]*. Moscow: Energiya, 359 p. (in Russian).

10. Deputy Head of Soyuzglavenergo (1961). *SO 34.37.513 (RD 34.37.513). Rukovodnyashchie ukazaniya po magnezialnomu obeskremlivaniyu vody [Corporate Standard SO 34.37.513 (Regulatory Documents RD 34.37.513). Guidelines on silica removal from water using magnesium oxide]*. Moscow: Gosenergoizdat, 100 p. (in Russian).

11. Klyachko, V. A. and Kastalsky, A. A. (1950). *Ochistka vody dlya promyshlennogo vodosnabzheniya [Water treatment for industrial water supply]*. Moscow: Stroyizdat, 336 p. (in Russian).

12. Knapp, R., Daily, J. and Hammit, F. (1974). *Kavitatsiya [Cavitation]*. Moscow: Mir, 688 p. (in Russian).

13. Lysov, D. S., Belyaev, A. N. and Flegentov, I. V. (2015). Otsenka perspektiv ispolzovaniya gidrodinamicheskoy kavitatsii v tekhnologii magnezialnogo obeskremlivaniya vody [Assessment prospects for application of hydrodynamic cavitation in the technology of silica removal from water using magnesium oxide]. In: *All-Russian Annual Scientific and Practical Conference "Society, Science, Innovations"*. Kirov: Vyatka State University, pp. 378–379 (in Russian).

14. Piteva, K. E. (1988). *Gidrogeokhimiya (uchebnoye posobiye dlya vuzov po spetsialnosti "Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya") [Hydrogeochemistry (study guide for students majoring in hydrogeology and engineering geology)]*, 2nd edition. Moscow: Publishing House of the Moscow State University, 315 p. (in Russian).

15. Prigun, I. V. and Krasnov, M. S. (2009). Tekhnologii ochistki vody ot kremniya. Problemy i osobennosti [Technologies of silica removal from water. Problems and main features]. In: *Proceedings of the 3rd Scientific and Practical Conference "Modern technologies of water treatment and equipment protection against corrosion and scaling"*, Moscow: Travers, part 1, pp. 70–81 (in Russian).

16. Stepanov, R. V. (1992). *Materialy k izucheniyu prichinno-sledstvennykh svyazey infarkta miokarda s vodnym faktorom*

[Materials to study cause-effect relations between myocardial infarction and the water factor]. PhD in Medicine. Kazan Medical Institute (in Russian).

17. Suslikov, V. L. (1979). K gigienicheskoy otsenke roli kremniya v pitevoy vode [Concerning hygienic assessment of the silicon role in drinking water]. *Hygiene and Sanitation*, No. 7, pp. 101–103. (in Russian).

18. Fesenko, L. N., Fedotov, R. V. and Ignatenko, S. I. (2012). Obeskremlivaniye pitevoy vody filtrovaniyem cherez modifitsirovannuyu zagruzku [Desilicization of drinking water by modified media filtration]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 11, pp. 20–29 (in Russian).

19. Frog, B. N. and Levchenko, A. P. (1996). *Vodopodgotovka [Water treatment]*. Moscow: Moscow State University, 680 p. (in Russian).

20. Shifrin, S. M. and Dmitriev, V. D. (1981). *Spravochnik po ekspluatatsii sistem vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya [Reference book for operation of water and gas supply, sewerage systems]*. Leningrad: Stroyizdat, 271 p. (in Russian).

21. Bergna, H. and Roberta, W. (2006). *Colloidal silica. Fundamentals and applications*. New York: CRC/Taylor & Francis, 912 p.

Авторы

Беляев Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент
Вятский государственный университет, г. Киров, Россия
E-mail: belyaev71@list.ru

Дегтерев Борис Иванович, канд. техн. наук, профессор
Вятский государственный университет, г. Киров, Россия
E-mail: b.degterev@mail.ru

Куц Елена Владиславовна, канд. техн. наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kouts@yandex.ru

Authors

Belyaev Andrey Nikolaevich, Ph. D. in Engineering,
Associate Professor
Vyatka state University, Kirov, Russia
E-mail: belyaev71@list.ru

Degterev Boris Ivanovich, Ph. D. in Engineering, Professor
Vyatka state University, Kirov, Russia
E-mail: b.degterev@mail.ru

Kuts Elena Vladislavovna, Ph. D. in Engineering, Associate
Professor
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil
Engineering, St. Petersburg, Russia
E-mail: kouts@yandex.ru