

УДК 544.32:66.086

МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА ПИТЬЕВОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Я.О. Шабловский

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48*

*Адрес для переписки: Шабловский Ярослав Олегович,
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Магнитная обработка водных систем с начала 1960 гг. широко применялась в отечественной строительной отрасли и в теплоэнергетике. В настоящее время принято считать, что этот метод неэффективен, но непредвзятый анализ огромного количества доступных результатов испытаний магнитной обработки показывает: констатируя неэффективность, в действительности подразумевают не отсутствие технического результата, а его нестабильность. Это неизбежно, поскольку соответствующие испытания – как успешные, так и неудачные – проводились «наугад». Наш анализ показал, что внешне простой эффект омагничивания имеет нетривиальную физико-химическую природу и обусловлен специфическими магнитохимическими и кристаллохимическими свойствами карбонатной подсистемы природной воды. Выявление этих фундаментальных закономерностей позволило дать практические рекомендации по осуществлению магнитной обработки водных систем. Особое внимание уделено омагничиванию водно-цементных смесей.

Ключевые слова: жёсткость воды, временная жёсткость, накипь, магнитная обработка, магнитное поле, кальцит, арагонит, фатерит, магнезит, цементные смеси

MAGNETIC TREATMENT FOR FRESHWATER SUPPLY AND FOR TECHNOLOGY

Ya.O. Shablovsky

*Gomel State Technical University,
Belorussia, 246746, Gomel, prosp. Oktiabria, 84*

*Corresponding author: Shablovsky Yaroslav Olegovich,
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Magnetic treatment of water has been known since the 1960s but is still the subject of much debate nowadays. This is largely due to lack of reliable scientific basis for magnetic water treatment. Despite the evidence of its efficiency the method is still being regarded with much skepticism. The common opinion is that passing water through a magnetic field could somehow influence its properties only if water could acquire long-lasting magnetically-induced changes of its properties. In the absence of any plausible physical mechanism for such acquirement no consensus has been reached yet as to the treatment's mode of operation which is conventionally regarded as enigmatic. Its trials were hit-or-miss that in its turn led to the method being discredited. To correct this situation we start with revealing the chemical nature of the phenomenon under discussion. The crystal structure and crystal morphology of the carbonate components of natural water are taken into account. Hereafter we proceed with analyzing qualitative laws of scale forming in a magnetic field and finish with elaborating practical recommendations for carrying out magnetic water treatment. Special attention is paid to magnetic water treatment to enhance the workability and compressive strength of concrete.

Keywords: freshwater, water hardness, temporary hardness, scale, magnetic treatment, magnetic field, calcite, aragonite, vaterite, magnesite, cement mixtures

Введение. Магнитная обработка водных систем применяется столь широко и столь эффективно, что некоторые авторы [1] даже расценивают это как довод против достоверности публикуемых сообщений об успешной апробации

этого метода. Некоторые сообщения подобного рода действительно выглядят фантастическими,^{*)} однако у противников магнитной обработки водных систем имеется и более серьёзное объективное возражение [4] – нестабильность технического результата такой обработки.

Наибольшее практическое значение имеет магнитная обработка жидкости затворения цементных систем. Именно для таких систем, с одной стороны, получены наиболее надёжные результаты испытаний магнитной обработки [5-9], а с другой стороны, наиболее актуально выяснение природы обсуждаемого эффекта.

Попытки оценить его количественно неизменно приводят к парадоксальному выводу [10]: для достижения технически значимого результата требуются недостижимо сильные магнитные поля. Между тем, практика магнитной обработки наглядно демонстрирует возможность не только эффективно управлять процессами гидратации и структурообразования цементных систем [7-9], но и интенсифицировать очистку сточных вод [11], а также осуществлять высокоэффективную безреагентную водоподготовку.

Магнитная обработка питьевой воды, проводимая с целью уменьшения отложений накипи на водонагревательных поверхностях, вызывает у скептиков особое недоверие. Испытания демонстрируют явное уменьшение накипеобразования в омагничиваемых водонагревателях [12-14], но наблюдаемый эффект не поддаётся объяснению, т.к. отчётливо выраженное противонакипное действие магнитного поля доказывают опыты, радикально различающиеся гидродинамическими особенностями обработки, её временным режимом, конструкцией установки, а также наличием/отсутствием в воде примесей железа в какой-либо форме. При этом имеют место значительные количественные различия накипеобразования при повторении испытания спустя длительный промежуток времени в неизменных (по мнению экспериментаторов) условиях [4]. Более того, в ходе продолжительных испытаний серийно выпускаемых водоо-

^{*)} Например, авторы [2] анонсировали апробацию технологии, которая, мягко говоря, не вполне согласуется с общепринятыми представлениями [3] о качестве пищевого этанола и путях его улучшения.

магничивающих установок обычно обнаруживается постепенное ослабление их эффективности [4, 14], а в отдельных случаях даже отмечалась «сезонность» – отсутствие технического результата магнитной обработки водопроводной воды во время и после таяния снега [15]. У многих авторов [1, 4, 16] это создаёт впечатление отсутствия у обсуждаемого эффекта каких-либо устойчивых закономерностей, тогда как с формальной точки зрения подобные факты лишь побуждают согласиться с мнением [17] о необходимости корректировок традиционного подхода, применяемого при расчётах электромагнитных эффектов в веществе.

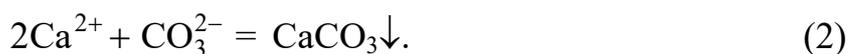
С этой целью в нашей предшествующей работе [18] был выполнен общий термодинамический анализ магнитохимических эффектов в гетерофазных реакционных смесях. В настоящей работе, опираясь на результаты [18], мы выявим химическую природу воздействия магнитного поля на водные системы и дадим практические рекомендации по осуществлению магнитной обработки таких систем с стабильно высоким техническим результатом.

Противонакипное омагничивание воды

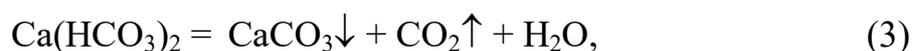
При нагревании природной воды содержащиеся в ней гидрокарбонат-ионы распадаются [19]:



В растворе накапливаются карбонат-ионы, вступающие во взаимодействие с ионами кальция:



Итоговый процесс



наиболее интенсивен при температурах $50 \div 75^\circ\text{C}$. При этом на его протекание существенно влияет повышение растворимости карбонатов с ростом концентрации c_{CO_2} углекислого газа в водном растворе (т.е. с ростом парциального давления p_{CO_2}) вследствие изменения величины рН раствора. Обработка данных [20] при $-9,75 \leq \log c_{\text{CO}_2} \leq -1$ дала следующие эмпирические зависимости:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 1 + 6,5136[-2 - \log c_{\text{CO}_2}]^{1/4}, \\ \text{pH} &= \frac{1}{0.1026 + 0.008481 p_{\text{CO}_2}^{0.2375}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\{p_{\text{CO}_2}\} = \text{Па}$.

Ранее уже отмечалось [18, 21], что поведение неизотермической водной системы в магнитном поле определяется специфическими магнитохимическими свойствами её карбонатной подсистемы. При наличии магнитного поля карбонат кальция, выделяющийся в ходе процесса (3), кристаллизуется не в форме кальцита (пр. гр. $R\bar{3}c$), образующего трудноудаляемую накипь на поверхностях, а в форме арагонита (пр. гр. $Pnam$), остающегося во взвешенном состоянии либо образующего легкоудаляемый шлам. При стандартном давлении и температурах $273^\circ\text{K} < T < 373^\circ\text{K}$ термодинамически устойчивой модификацией CaCO_3 является кальцит: $\Delta G_c < \Delta G_a$, где ΔG_c – молярная энергия Гиббса образования кальцита, ΔG_a – молярная энергия Гиббса образования арагонита. Наш расчёт, опирающийся на результаты [18, 21], показал следующее. При нагревании воды в обычных условиях термодинамический запрет кристаллизации арагонита вместо кальцита усиливается, т.к. с ростом температуры отрицательная величина $\delta G = \Delta G_c - \Delta G_a$ возрастает по модулю. Однако это возрастание выражено очень слабо, благодаря чему не требует температурной корректировки величина h_a напряжённости постоянного магнитного поля, снимающего термодинамический запрет образования арагонита: $h_a \sim 5 \text{ кЭ}$, что соответствует магнитной индукции $\sim 0.5 \text{ Тл}$.

Противонакипный эффект магнитной обработки воды обусловлен сочетанием трёх факторов.

Определяющим является магнитоиндуцированное снятие термодинамического запрета кристаллизации арагонитовой модификации CaCO_3 в карбонатном растворе. Действие этого фактора усиливается тем, что, во-первых, по сравнению с кальцитовой модификацией структура арагонитовой модификации обладает более высоким кристаллохимическим приоритетом $\{P_{\text{nam}}: R\bar{3}c = 4.94:1\}$, а во-вторых, структуры арагонита и кальцита топотактически несопряжимо [22].

Арагонитовая модификация CaCO_3 , имеющая по сравнению с кальцитом кристаллохимическое преимущество, при омагничивании приобретает решающее – термодинамическое – преимущество. Благодаря этому омагничивание воды, начатое одновременно с её нагревом, обеспечивает формирование зародышей арагонита, предопределяя весь дальнейший процесс образования карбонатного осадка. А именно, при последующем нагреве природной воды вне магнитного поля продолжается осаждение CaCO_3 в форме арагонита, т. к. отрицательность температурного коэффициента растворимости карбонатов стабилизирует зародыши арагонита, а кристаллизация кальцита на этих зародышах невозможна в силу топотактической несопряжимости структур кальцита и арагонита.

Противонакипный эффект в обработанной воде сохраняется в течение промежутка времени, необходимого для растворения зародышей арагонита, образовавшихся в ходе омагничивания воды. На практике это проявляется постепенным ослаблением противонакипного эффекта в воде, предварительно обработанной магнитным полем, а затем выдержанной вне этого поля без нагрева.

Противонакипный эффект омагничивания может ослабляться избыточным содержанием в воде органических примесей.^{*)} Их наличие способно иска-

^{*)} В пресной воде открытых источников присутствуют гуминовые кислоты и их соли, содержание которых значительно повышается во время половодья. При несовершенной очистке воды из таких источников проявляется упомянутая выше «сезонность» эффекта омагничивания.

жать ход кристаллизации CaCO_3 при нагревании воды, вызывая выделение карбоната кальция в форме фатерита.

Эта модификация CaCO_3 существует только как биоминерал и в свободном состоянии неустойчива: выделенный из биокерамического сырья фатерит необратимо превращается в кальцит [23]. В то же время, по сравнению с другими модификациями карбоната кальция фатерит (пр. гр. $R\bar{6}_3/mmc$) имеет исключительно высокий кристаллохимический приоритет:

$$R\bar{6}_3/mmc : Pnam : R\bar{3}c = 38.17 : 4.94 : 1. \quad (5)$$

«Кристаллохимическая целесообразность» образования фатеритовой модификации CaCO_3 подтверждена экспериментально: доказано [24], что карбонат кальция может кристаллизоваться в форме фатерита при наличии в растворе примесей органических соединений. В свете вышесказанного очевидно, что омагничивание раствора усилит эту тенденцию. Вместе с тем, после прекращения омагничивания доминирующим фактором окажется мероздричность термодинамически устойчивого кальцита по отношению к термодинамически неустойчивому фатериту, предопределяющая трансформацию фатерита в кальцит. Таким образом, при наличии органических примесей в воде её омагничивание не подавит, а лишь замедлит образование кальцитовых отложений: возникающий на начальной стадии процесса легкоудаляемый осадок лепестковых микрокристаллов фатерита постепенно формирует прочный поликристаллический слой кальцита (см. рис. 1).

Природные воды могут содержать большое количество ионов Mg^{2+} . В таком случае противонакипное омагничивание воды целесообразно осуществлять на всём протяжении её нагрева вплоть до температур $\sim 90^\circ\text{C}$.

Во-первых, изоструктурный кальциту магнезит MgCO_3 (пр. гр. $R\bar{3}c$) имеет по сравнению с арагонитом пониженный кристаллохимический приоритет {см. (5)}. Преимущественное протекание в магнитном поле реакции (2) с обра-

зованием арагонита обеспечивает интенсивное связывание ионов CO_3^{2-} арагонитовым шламом и значительно снижает количество карбонат-ионов, способных образовывать магnezитовую накипь.

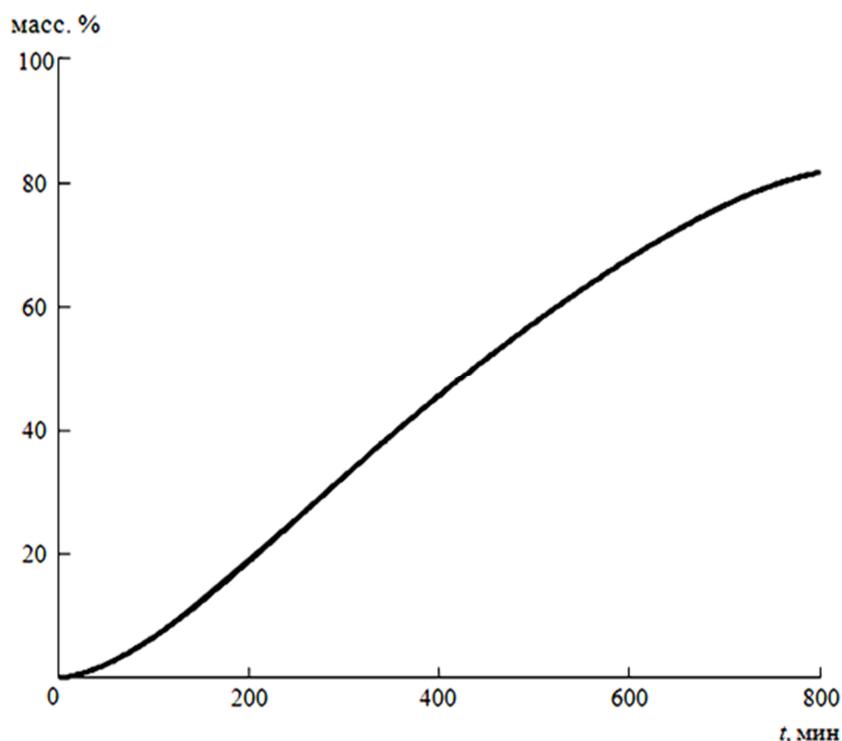
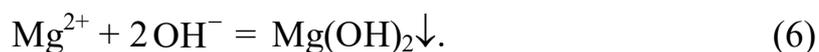


Рис. 1. Кинетика трансформации фатерита в кальцит (по данным [23])

Во-вторых, осаждающимся из карбонатного раствора кристаллам магnezита свойственно менять габитус при изменении pH раствора [25]. Обусловленное процессом (1) повышение давления p_{CO_2} уменьшает pH раствора {см. (4)}, в результате чего вместо ромбоэдрических кристаллов, образующих прочные отложения магnezита на поверхностях, в омагничиваемой воде возникают рыхлые агрегаты иглоподобных кристаллов MgCO_3 . Прямое наблюдение такого магнитоиндуцированного изменения габитуса MgCO_3 описано в работе [26].

В-третьих, в горячей воде существенный вклад в накипеобразование вносят отложения брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$: при температурах от 82°C вторичному процессу (2) обычно сопутствует процесс



В омагничиваемой с начала нагрева воде процесс (6) оказывается подавлен, т. к. соответствующий ему первичный процесс высокотемпературного разложения гидрокарбонат-иона



подавляется смещением его равновесия влево благодаря созданному предшествующим низкотемпературным процессом (1) повышенному давлению p_{CO_2} и вызванному этим повышением уменьшению рН раствора.

Подавление отложений брусита имеет особое практическое значение, поскольку речь идёт о некарбонатной накипи, тяжело поддающейся удалению с водонагревательных поверхностей. Для удаления карбонатных отложений можно использовать те же магнитохимические эффекты, которые выше были рассмотрены в контексте предотвращения образования этих отложений.*)

Такая возможность обеспечивается тем, что общее количество содержащегося в воде углекислого газа имеет базовую и реактивную составляющие. Реактивная составляющая – результат термического разложения гидрокарбонатов {реакции (1), (7)}, а базовая составляющая изначально присутствует в воде наряду с другими растворёнными в ней газами (O_2 , N_2 , H_2S , CH_4 и т. д.). Базовое содержание CO_2 в воде изменяется вслед за изменениями атмосферного давления, поэтому при длительных временных промежутках между опытами количественные оценки накипеобразования в омагниченной воде неизбежно различаются. Реактивная составляющая p_{CO_2} соразмерна карбонатной жёсткости обрабатываемой воды (рис. 2), тогда как базовую составляющую легко повысить нагнетанием CO_2 в воду. Благодаря изменению рН раствора {формулы (4)} это

*) Возможность удаления накипных отложений путём омагничивания котловой воды была экспериментально доказана ещё в 70-х г.г. прошлого века [27].

интенсифицирует растворение карбонатных отложений, т. е. насыщение раствора ионами CO_3^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Последующий нагрев раствора в магнитном поле будет сопровождаться описанными выше явлениями – образованием арагонитового и магнезитового шлама. Такую обработку целесообразно проводить циклично, чередуя насыщение холодной воды углекислым газом с её последующим прогревом в замкнутом объёме в постоянном магнитном поле; каждый цикл обработки трансформирует карбонатные отложения на водонагревательных поверхностях в высокодисперсный шлам.

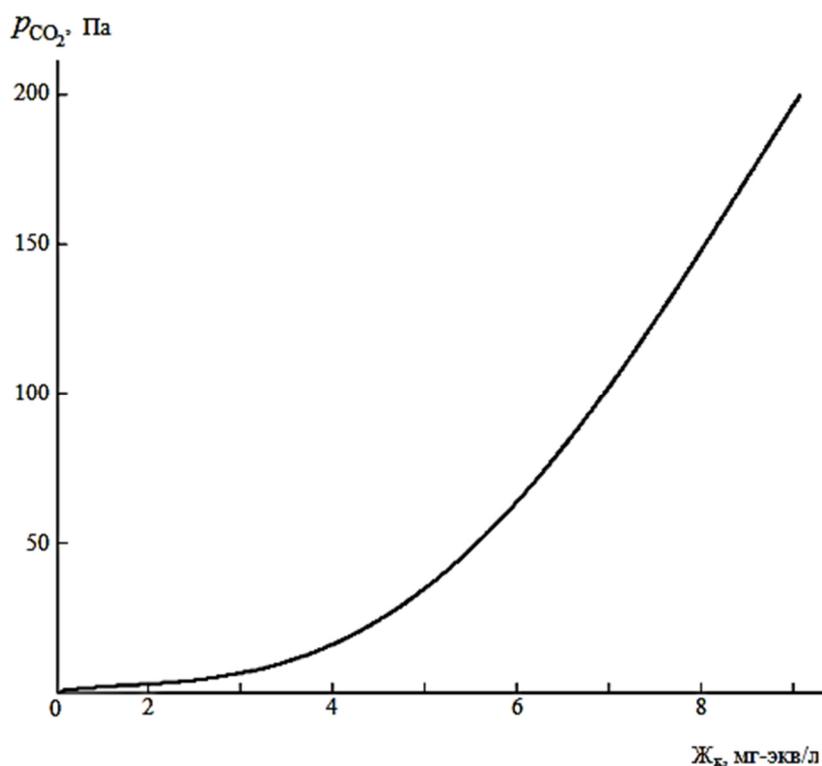


Рис. 2. Зависимость парциального давления углекислого газа в природной воде от её карбонатной жёсткости при стандартных условиях (по данным [20])

Действие магнитного поля при обработке воды обеспечивается магнитондуцированным приращением молярной энергии Гиббса, которое создаётся потенциальной энергией консервативных сил [18]. По этой причине обработка воды переменным магнитным полем тем менее эффективна, чем больше частота поля. Конструктивное исполнение омагничивающей установки, позволяющей обрабатывать воду однородным постоянным магнитным полем, представ-

лено в работе [21]. Однородность поля при магнитной обработке воды обязательна. В противном случае, т. е. при наличии градиента магнитного поля, на его границах будут скапливаться микрокристаллы окислов железа (магнетита и т.п.), перекрывая омагничиваемое сечение трубы.

Эти скопления очень часто обнаруживались при вскрытии типовых установок для магнитной обработки воды после длительных испытаний [28, с. 36] и существенно осложняли водоподготовку, что и предопределило постепенно сформировавшееся стойкое убеждение в нецелесообразности противонакипного омагничивания. Между тем, упомянутый магнитноградиентный эффект, во-первых, легко устраняется адекватным конструктивным исполнением омагничивающей установки (см. [21]), а во-вторых, не является сугубо вредным: его можно использовать для железомарганцевой фильтрации воды.

Железомарганцевая фильтрация воды

Стандартная методика очистки воды от примесей железа основана на окислении содержащихся в воде ионов Fe^{2+} до Fe^{3+} для их последующего удаления в форме гидроксида $Fe(OH)_3$. В нейтральных и щелочных водах такое окисление можно осуществить прямой аэрацией. В то же время, при $pH < 6,8$ прямая аэрация неэффективна, что вынуждает использовать средства каталитического окисления и, соответственно, резко снижает производительность водочистки. Удаление из воды избыточного содержания марганца традиционными методами также низкопроизводительно, поскольку осуществляется путём окисления ионов Mn^{2+} до Mn^{3+} и/или Mn^{4+} с образованием нерастворимых гидроксидов в каталитических фильтрах на основе ионообменных смол.

Магнитно-градиентная железомарганцевая фильтрация заключается в пропускании воды через область неоднородного магнитного поля. Его воздействие усиливает электроотрицательность ферромагнитных и парамагнитных металлов [18], благодаря чему интенсифицируются окислительные процессы, переводящие содержащиеся в воде железо и марганец в нерастворимые окисные соединения (магнетит, гаусманнит, пиролюзит и т.д.), оседающие на границах градиентной области.

В отличие от базовой водоомагничивающей установки (см. [21]) конструктивное исполнение магнитно-градиентного железомарганцевого фильтра вариативно. Источником рабочего магнитного поля фильтра может служить любой постоянный магнит, создающий в объёме фильтра индукцию $0,25 \div 0,5$ Тл. Пространственная неоднородность рабочего поля обеспечивается наличием в этом объёме ферромагнитного наполнителя. Магнитное поле индуцирует в обрабатываемой воде окислительные реакции, ведущие к оседанию нерастворимых окисных соединений железа и марганца на поверхности зёрен ферромагнитного наполнителя. Для питьевого водоснабжения рекомендуется заполнение фильтра шариками из хромоникелевой стали 18/10 (сталь 12×18Н10). Для очистки сильно загрязнённых железом вод в качестве наполнителя можно использовать размолотую металлургическую окалину. В последнем случае при прочистке фильтра сработавший наполнитель можно размолоть, просеять и использовать повторно.

Омагничивание водно-цементных смесей

Высокая карбонатная жёсткость способна оказаться не недостатком, а достоинством воды, если речь идёт о воде для затворения цементных смесей. При этом особо высокие прочностные и эксплуатационные характеристики бетона достигаются при омагничивании цементных смесей, затворяемых такой водой.

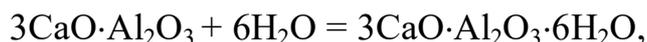
Наиболее эффективное управление формированием цементного камня обеспечивают контролируемые воздействия, усиливающие гидратацию клинкерных минералов [29]. Гидратация в водно-цементной суспензии сопровождается значительным тепловыделением, благодаря чему при воздействии магнитного поля на затворяющую цемент воду протекает процесс (3) с образованием арагонита. Ранее было показано [21], что константа скорости реакции образования арагонита существенно превосходит константу скорости реакции образования кальцита. Вследствие этого омагничивание обеспечивает интенсивное повышение p_{CO_2} в квазизамкнутых реакционных микрообъёмах водно-

цементной суспензии и в конечном итоге снижает pH водного раствора {см. (4)}.

При омагничивании воды, затворяющей портландцемент, такое магнитоиндуцированное снижение pH раствора ускоряет реакции гидратации трёхкальцевого и двухкальцевого силикатов



В результате уменьшается «отставание» кристаллизации алитовой и белитовой фаз цементного камня от гидратации трёхкальцевого алюмината



что существенно повышает однородность цементного камня, т. е. его прочность. Тот же фактор – магнитоиндуцированное снижение pH раствора – интенсифицирует гидратацию глинозёмистого цемента, ускоряя выделение аморфного гидроксида алюминия в различных основных формах и экстрагирование оксида кальция из гидратных алюминатов в воду затворения с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В свете сказанного становится понятен обнаруженный авторами [7] полиэкстремальный (волнообразный) характер зависимости прочности цементного камня от количества циклов магнитной активации воды затворения. Поскольку обрабатываемая вода находилась в свободном газообмене с атмосферным воздухом, авторы [7] зарегистрировали осцилляции, симбатные осцилляциям p_{CO_2} в воде затворения.

Выводы. 1. Эффект омагничивания природной воды обусловлен специфическими магнитохимическими и кристаллохимическими свойствами её карбонатной подсистемы.

2. Противонакипная обработка воды должна проводиться в однородном постоянном магнитном поле напряжённостью ~ 5 кЭ, что соответствует магнитной индукции ~ 0.5 Тл. Омагничивание воды должно начинаться одновременно с её нагревом. Омагничивание воды с невысоким содержанием ионов Mg^{2+} можно прекратить после её прогрева до температуры $\sim 75^\circ C$. Магнитная обработка воды с повышенным содержанием ионов Mg^{2+} должна производиться до температур $\sim 90^\circ C$.

3. Противонакипный эффект в обработанной в вышеуказанном режиме воде сохраняется в течение промежутка времени, необходимого для растворения зародышей арагонита, образовавшихся в ходе омагничивания воды. Обработке воды из открытых источников должно предшествовать предварительное удаление органических примесей.

4. Омагничивание воды не только подавляет образование твёрдых накипных отложений на водонагревательных поверхностях, но и способствует удалению уже имеющихся карбонатных отложений. Наиболее эффективно циклическое чередование насыщения холодной воды углекислым газом с её последующим прогревом в замкнутом объёме в постоянном магнитном поле. Каждый цикл обработки трансформирует карбонатные отложения на водонагревательных поверхностях в высокодисперсный шлам.

5. Для железомарганцевой фильтрации воды целесообразно её пропускание через область неоднородного магнитного поля. Источником рабочего магнитного поля фильтра может служить любой постоянный магнит, создающий в объёме фильтра индукцию $0,25 \div 0.5$ Тл. Пространственная неоднородность рабочего поля обеспечивается наличием в этом объёме ферромагнитного наполнителя. Для питьевого водоснабжения рекомендуется заполнение фильтра шариками из хромоникелевой стали 18/10 (сталь 12×18Н10). Для очистки сильно загрязнённых железом вод в качестве наполнителя можно использовать размолотую металлургическую окалину.

6. Омагничивание воды, затворяющей портландцемент, ускоряет реакции гидратации трёхкальциевого и двухкальциевого силикатов, уменьшая «отстава-

ние» кристаллизации алитовой и белитовой фаз цементного камня от гидратации трехкальциевого алюмината. Омагничивание воды, затворяющей глинозёмистый цемент, ускоряет выделение аморфного гидроксида алюминия в различных основных формах и экстрагирование оксида кальция из гидратных алюминатов в воду затворения с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Список литературы

1. Coey J. Magnetic water treatment – how might it work? // *Philosophical Magazine*. 2012. Vol. 92, № 31. P. 3857-3865.

2. Григоренко С., Попова В., Фефелов А., Боровикова Н. Применение магнитных полей для повышения качества спирта // *Продовольственная индустрия АПК*. 2012. № 3 (17). С. 18-21.

3. Рудаков О.Б., Никитина С.Ю., Кудухова И.Г. Сорбционные и ионообменные методы очистки пищевого этилового спирта и полупродуктов брагоректификации от микропримесей (обзор) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2010. Т. 10. № 3. С. 389-400.

4. Очков В. Ф. Магнитная обработка воды: история и современное состояние // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2006. № 2 (40). С. 12-17.

5. Nan S., Chea-Fang W. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25, № 7. P. 681-688.

6. Soto-Bernal J., Gonzalez-Mota R., Rosales-Candelas J. Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 934195-1–934195-9.

7. Роль цикловой магнитной обработки воды затворения в управлении процессами гидратации и структурообразования цементных систем / В.Н. Сафронов [и др.] // *Вестник Томского архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4. С. 135-148.

8. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть II. Структурные характеристики минералов в ранние сроки твердения цементного камня при использовании магнитно-активированной воды затворения / Ю.А. Абзаев [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 150-159.

9. Комбинированная обработка жидкости затворения цементных систем / Ю.С. Саркисов [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 2. С. 163-170.

10. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть I. Теоретические предпосылки влияния магнитного поля на физико-химические процессы / Н.П. Горленко [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 134-150.

11. Давыдова Е.Г. Анализ качества природной воды водоёма, находящегося вблизи рудодобывающего предприятия // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1 (49). С. 37-45.

12. Chibowski E. Szcześ A. Magnetic water treatment – A review of the latest approaches // Chemosphere. 2018. Vol. 203, № 1. P. 54-67.

13. Lin L., Pei X. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems // NPJ Clean Water. 2020. Vol. 3, № 1. P. 25-1–25-20.

14. Latva M. Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system / M. Latva [et al] // Journal of Water Process Engineering. 2016. Vol. 9, № 1. P. 215-224.

15. Бондаренко Н.Ф., Гах Е.З. Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 152 с.

16. Baker J.S., Judd S.J. Magnetic amelioration of scale formation // Water Research. 1996. Vol. 30, № 2. P. 247-260.

17. Павлов Б.Л., Никишина А.И., Давыдова Е.Г. Двухкомпонентная модель вырожденного идеального электронного газа // Химия, физика и механика материалов. 2016. № 2 (13). С 100-108.

18. Шабловский Я.О. Магнитное управление химическими свойствами неферромагнитных материалов // Химия, физика и механика материалов. 2019. № 4 (23). С. 93-109.
19. Morse J. W. The kinetics of calcium carbonate dissolution and precipitation // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 1983. Vol. 11, № 1. P. 227-264.
20. Минаев А.Н., Кашинский В.И., Лысенко Л.В. Термическая технология высокоминерализованных вод. Под ред. О.И. Мартыновой. Москва, Изд-во ВИНТИ РАН, 1992. 414 с.
21. Шабловский Я.О. Преемственность структур при топохимическом синтезе кристаллических материалов // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 2 (25). С. 48-78.
22. Шабловский Я.О. Кристаллохимия реакций на поверхности твёрдой фазы // Химия, физика и технология поверхности. 2020. Т. 11. № 3. С. 330-346.
23. Nehrke G. Calciet precipitatie uit een waterige oplossing // Geologica Ultraiectina. 2007. Vol. 273. S. 75.
24. Конопаска-Łyskawa D. Precipitation and transformation of vaterite calcium carbonate in the presence of some organic solvents // Materials. 2020. Vol. 13, № 12. P. 2742-1–2742-14.
25. Apriani M., Hadi W., Masduqi A. Synthesis of magnesium carbonate polymorphs from Indonesia traditional salt production wastewater // EnvironmentAsia. 2018. Vol. 11, № 2. P. 140-148.
26. Саркисов Ю. С. Температурные отклики воды и водных растворов на внешнее воздействие магнитным полем / Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко, В. Н. Сафронов, С. А. Кугаевская // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2015. № 2. С. 20-29.
27. Тихомиров Г.И. Разрушение накипных отложений в паровых котлах при обработке питательной воды постоянным магнитным полем // Вопросы теории магнитной обработки воды и водных систем: Сб. науч. тр. / Под ред. В.И. Классена. М.: Цветметинформация, 1971. С. 283-288.

28. Тихомиров, Г. И. Технологии обработки воды на морских судах. Владивосток: Морской гос. ун-т, 2013. 159 с.

29. Перцев В.Т., Козодаев С.П. Химизация и наномодифицирование – современный путь совершенствования технологии цементных систем // *Химия, физика и механика материалов*. 2020. № 1 (24). С. 121-130.

References

1. Coey J. Magnetic water treatment – how might it work? // *Philosophical Magazine*. 2012. Vol. 92, no. 31. P. 3857-3865.

2. Grigorenko S., Popova V., Fefelov A., Borovikova N. [Applying magnetic fields to enhance the quality of alcohol]. *Agricultural industry*, 2012, no. 3 (17). P. 18-21. (in Russian).

3. Rudakov, O.B., Nikitina, S.J., Kudukhova, I.G. Sorption and ion-exchange methods of purification of food ethanol and intermediate products of span-rectification from microimpurities (A Review) // *Sorption and chromatographic processes*, 2010, vol. 10, no. 3. P. 389-400.

4. Ochkov V.F. [Magnetic water treatment: history and state of the art]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 2 (40). P. 12-17. (in Russian).

5. Nan S., Chea-Fang W. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25, № 7. P. 681-688.

6. Soto-Bernal J., Gonzalez-Mota R., Rosales-Candelas J. Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 934195-1–934195-9.

7. Safronov V.N., Gorlenko N.P., Sarkisov Ju.S., Abzaev Ju.A., Kugaevskaja S.N. [The role of magnetic water processing for controlling hydration and structure forming in cement systems]. *Journal of construction and architecture*, 2014, no. 4. P. 135-148. (in Russian).

8. Abzaev Ju.A., Safronov V.N., Sarkisov Ju.S., Gorlenko N.P., Kugaevskaja S.N. [Magnetic field as control for the structure and properties of cement systems. Part 2. Structural properties of minerals at cement brick early hardening using mixing water magnetic activation]. *Journal of construction and architecture*, 2015, no. 4. P. 150-159. (in Russian).
9. Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P., Rubanov A.A., Vergasov V.V. [Combined processing of mixing water for cement systems]. *Journal of construction and architecture*, 2018, vol. 20, no. 2. P. 163-170. (in Russian).
10. Gorlenko N.P., Safronov V.N., Abzaev Y.A., Sarkisov Y.S., Kugaevskaya S.N., Ermilova T.A. [Magnetic field as factor of control for structure and properties of cement systems. Part 1. Theoretical prerequisites for magnetic effect on physico-chemical processes], *Journal of construction and architecture*, 2015, no. 3. P. 134-150. (in Russian).
11. Davydova E.G. [Analysis of the quality of natural water of a reservoir near an ore extraction plant]. *Scientific journal of construction and architecture*, 2018, no. 1 (49). P. 37-45. (in Russian).
12. Chibowski E. Szcześ A. Magnetic water treatment – A review of the latest approaches // *Chemosphere*. 2018. Vol. 203, № 1. P. 54-67.
13. Lin L. Pei X. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems // *NPJ Clean Water*. 2020. Vol. 3, № 1. P. 25-1–25-20.
14. Latva, M. Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system / M. Latva [et al] // *Journal of Water Process Engineering*. 2016. Vol. 9, № 1. P. 215-224.
15. Bondarenko N.F., Gah E.Z. *Elektromagnitnye yavleniya v prirodnyh vodah*. L.: Gidrometeoizdat, 1984. (in Russian).
16. Baker J.S., Judd S.J. Magnetic amelioration of scale formation // *Water Research*. 1996. Vol. 30, № 2. P. 247-260.

17. Pavlov B.L., Nikishina A.I., Davydova E.G. [Two-component model of a degenerate ideal electron gas]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2016. no. 2 (13). С 100-108. (in Russian).
18. Shablovsky Ya.O. [Magnetic controlling chemical properties of non-ferromagnetic materials]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials]. 2019, no. 4. P. 93-109.
19. Morse J.W. The kinetics of calcium carbonate dissolution and precipitation // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 1983. Vol. 11, № 1. P. 227-264.
20. Minaev A.N., Kashinskij V.I., Lysenko L.V. *Termicheskaya tekhnologiya vysokomineralizovannyh vod*. Moskva, Izd-vo VINITI RAN, 1992. (in Russian).
21. Shablovsky Ya.O. [Succession of structures at topochemical synthesis of crystalline materials]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov* [Chemistry, physics and mechanics of materials]. 2020, no. 2. P. 48-78. (in Russian).
22. Shablovsky Ya.O. Crystal chemistry of reactions on solid surfaces // *Chemistry, Physics & Technology of Surface*. 2020, vol. 11, no 3. P. 330-346.
23. Nehrke G. Calciet precipitatie uit een waterige oplossing // *Geologica Ultraiectina*. 2007. Vol. 273. 75 p.
24. Konopacka-Łyskawa D. Precipitation and transformation of vaterite calcium carbonate in the presence of some organic solvents // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 12. P. 2742-1–2742-14.
25. Apriani M., Hadi W., Masduqi A. Synthesis of magnesium carbonate polymorphs from Indonesia traditional salt production wastewater // *EnvironmentAsia*. 2018. Vol. 11, № 2. P. 140-148.
26. Sarkisov U.S., Gorlenko N.P., Safronov V.N., Kugaevskaya S.A. [Thermal responses of water and water solutions on the external magnetic field]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Himiya*, 2015, no. 2. P. 20-29. (in Russian).
27. Tihomirov G.I. [Razrushenie nakipnyh otlozhenij v parovyh kotlah pri obrabotke pitatel'noj vody postojannym magnitnym polem] *Voprosy teorii magnitnoj*

obrabotki vody i vodnyh sistem: Sb. nauch. tr. / Pod red. V.I. Klassena. M.: Cvetmetinformacija, 1971. P. 283-288. (in Russian).

28. Tihomirov, G. I. Tekhnologii obrabotki vody na morskikh sudah. Vladivostok: Morskoj gos. un-t, 2013. (in Russian).

29. Percev V.T., Kozodaev S.P. [Chemization and nanomodifying for the aims of developing cement technologies] Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2020. № 1 (24). P.121-130. (in Russian).

Шабловский Ярослав Олегович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и электротехники Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого