

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНОМАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ РАСТВОРОВ CaCl_2
И $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ****Т.Е. Слизнева, М.В. Акулова, П.Б. Разговоров**

Татьяна Евгеньевна Слизнева

Кафедра информационных технологий и сервиса, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: tatjanaslizneva@mail.ru

Марина Владимировна Акулова *

Кафедра строительного материаловедения и технологий, Ивановский государственный политехнический университет, ул. Красных Зорь, 25, Иваново, Российская Федерация, 153003

E-mail: k_smt@ivgpu.com*

Павел Борисович Разговоров

Ярославский государственный технический университет, ул. Кривова, 40, Ярославль, Российская Федерация, 150048

E-mail: drpbr1@gmail.com

Рассмотрен механизм совместного влияния магнитного поля и гидродинамической кавитации на свойства растворов CaCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, используемых для затворения цементных паст. Гидродинамическая кавитация приводит к образованию активных форм кислорода, анионов HCO_3^- , нанобузырьков углекислого газа и инициирует взаимодействие новых форм с катионами металлов примесных веществ, растворенных в воде. При механомагнитной обработке растворов в них обнаружены частицы твердой фазы размером 5...10 и 10...100 нм. Наблюдаемое увеличение ζ -потенциала свидетельствует о стабилизации таких дисперсных систем с сохранением в них наноразмерных фракций (до 3 сут.). Одновременно облегчается протекание реакций в стесненных условиях после осуществления затворения цементной пасты. Эффект активирующих факторов в водопроводной воде выражен более ярко, чем в дистиллированной, что объясняется протеканием процесса гидратации карбонат-иона и образованием мелкодисперсных центров нуклеации. С применением рентгенофазового анализа установлено, что в получаемом цементном камне, наряду с кальцитом, кристаллизуется арагонит, практически отсутствующий в контрольном образце. Кроме того, анализ дифрактограмм, снятых на модифицированных образцах, обнаруживает включение карбонат-иона. Очевидно, оптимизация порового пространства в цементном камне достигается как за счет кольматации пор мелкодисперсным карбонатом кальция, так и посредством образования мелких пор при кристаллизации этtringитоподобных фаз. Установлено, что получаемый цементный камень характеризуется повышенными прочностью (на 9-30%) и морозостойкостью (до 55%) по сравнению с таковым, полученным традиционным способом.

Ключевые слова: цементный камень, механомагнитная активация, хлорид кальция, тиосульфат натрия, рентгенофазовый анализ

Для цитирования:

Слизнева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б. Влияние механомагнитной активации растворов CaCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ на фазовый состав цементного камня. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 101–107

For citation:

Slizneva T.A., Akulova M.V., Razgovorov P.B. Influence of mechanomagnetic activation of solutions CaCl_2 and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ on phase structure of cement stone. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 12. P. 101–107

INFLUENCE OF MECHANOMAGNETIC ACTIVATION OF SOLUTIONS CaCl_2 AND $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ON PHASE STRUCTURE OF CEMENT STONE

T.A. Slizneva, M.V. Akulova, P.B. Razgovorov

Tatyana E. Slizneva

Department of Information Technologies and Services, Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: tatjanaslizneva@mail.ru

Marina V. Akulova*

Department of Building Materials and Technologies, Ivanovo State Polytechnic University, Krasnykh Zor st., 25, Ivanovo, 153003, Russia
E-mail: k_smt@ivgpu.com*

Pavel B. Razgovorov

Yaroslavl State Technical University, Krivova st., 40, Yaroslavl, 150048, Russia
E-mail: drpbr1@gmail.com

The mechanism of the joint influence of the magnetic field and hydrodynamic cavitation on the properties of CaCl_2 and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ solutions used for mixing cement pastes is considered. Hydrodynamic cavitation leads to the formation of reactive oxygen forms, HCO_3^- anions, carbon dioxide nanobubbles, and initiates the interaction of new forms with impurity metal cations dissolved in water. After mechanomagnetic treatment of the solutions, particles of a solid phase with sizes of 5...10 and 10...100 nm were found in them. The observed increase in the ζ -potential indicates the stabilization of such dispersed systems with the preservation of nanoscale fractions in them (up to 3 days). At the same time, the progress of reactions under the conditions of tightness that occur after cement paste has been mixed. The effect of activating factors in tap water is more pronounced than in distilled water, which is explained by the process of hydration of the carbonate ion and the formation of fine nucleation centers. Using X-ray phase analysis, it was found that, along with calcite, aragonite crystallizes in the resulting cement stone, which is practically absent in the control sample. In addition, the analysis of diffraction patterns taken on the modified samples reveals the inclusion of a carbonate ion. Obviously, optimization of the pore space in the cement stone is achieved both by clogging the pores with fine calcium carbonate, and by forming small pores during crystallization of ettringite-like phases. It is established that the resulting cement stone is characterized by increased strength (by 9-30%) and frost resistance (up to 55%) compared to that obtained by the traditional method.

Key words: cement stone, mechanomagnetic activation, calcium chloride, sodium thiosulfate, X-ray phase analysis

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка воды имеет важнейшее значение для многих отраслей народного хозяйства и, в частности, особо актуальна в производстве цементных бетонов с улучшенными физико-химическими и потребительскими характеристиками. Предварительная магнитная, гидродинамическая, электрохимическая или акустическая активация жидкости перед осуществлением процесса затворения бетонной смеси является недорогим и экологически безопасным способом повышения качества бетона, позволяющим существенно снизить затраты на его производство. Так, анализ работ [1-5] по омагничи-

ванию воды затворения выявляет, что в итоге достигается повышение прочностных и электроизоляционных характеристик бетона и, напротив, снижение водопоглощения, общей пористости и деформации последнего. Кроме того, применение омагниченной воды позволяет решить задачу исключения из композиции дорогостоящих пластификаторов и снижения расхода цемента. Вместе с тем механизм совместного воздействия на жидкость затворения, а также структуру цементной матрицы факторов магнитного поля и высокоскоростного перемешивания, в условиях развитой кавитации, изучен к настоящему времени в недостаточной степени.

Согласно [6], влияние магнитного поля на водные растворы проявляется в ускорении кристаллизации растворенных примесей, уменьшении размеров кристаллов, выпадающих в объеме, а также изменении смачиваемости твердых поверхностей и ускорении адсорбции твердых тел.

Омагничиванию воды в производстве бетонов предшествовали разработки, посвященные актуальной проблеме очистки паровых котлов и др. теплоэнергетического оборудования [7-9]. Так, в [9] отмечается, что магнитная обработка воды с целью удаления накипи приводит к выпадению карбоната кальция в виде арагонита. Факт изменения габитуса кристаллов карбоната кальция установлен эмпирически; однако на сегодняшний день еще отсутствует единое мнение относительно механизма действия в таких случаях магнитного поля. В основном, эффект влияния последнего на физико-химические свойства водных растворов и дисперсий объясняется с гидродинамических позиций либо как результат протекающего гидратационного процесса [8, 10].

Магнитогидродинамические явления осуществляются в движущейся жидкости, помещенной в магнитное поле, и объясняются действием силы Лоренца на все содержащиеся в жидкости частицы. Сила Лоренца, в частности, оказывает влияние и на отдельные молекулы воды [11], обладающие дипольным моментом, что закономерно обеспечивает разрушение водородных связей и образование водных кластеров меньшего размера. С данной гипотезой хорошо согласуются результаты квантово-химических расчетов, выполненные с использованием программы GAUSSIAN 98 [12].

В основе же объяснения гидратационного механизма лежит действие магнитного поля на границу раздела фаз газ – жидкость [8]. При этом газовая фаза может присутствовать в жидкой в виде нанопузырьков. В результате индуцированных возмущений системы обеспечивается приток энергии активации, которая увеличивает ее энтропию [10, 13].

Анализ литературных источников [6, 9, 13, 14] позволяет считать, что степень влияния магнитного поля на процессы нуклеации определяется не только скоростью движения, но и режимом потока, а также ионным составом жидкости. Так, в условиях развитой кавитации вода подвергается термолузу, в результате чего образуются электронно-возбужденные молекулы H_2O^\bullet и свободные короткоживущие радикалы H^\bullet и OH^\bullet . Их последующая рекомбинация способствует получению H_2O_2 и возникновению других активных форм кислорода

[15]. Механическая обработка в кавитационном аппарате обеспечивает получение анионов CO_3^{2-} и нанопузырьков CO_2 , равномерно распределенных по объему жидкости и искажающих водородные связи в присутствии молекул H_2O . Наличие в воде затворения посторонних ионов, вводимых в бетоны в качестве химических добавок, вносит дополнительные искажения в сетку H -связей. Постепенный переход молекул H_2O^\bullet в основное состояние сопровождается испусканием квантов энергии, инициирующих химические реакции гидратации при затворении цементных паст.

Целью настоящей работы служило изучение механизма совместного влияния механической и магнитной обработки воды затворения, содержащей неорганические добавки, на фазовый состав цементного камня.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработку жидкости затворения осуществляли в кавитационном аппарате роторного типа, на выходе которого располагался постоянный магнит с коэрцитивной силой 140 кА/м. Аппарат был снабжен панелью управления, позволяющей задавать интенсивность перемешивания и время обработки. Частоту вращения ротора варьировали в диапазоне 2500-4200 мин⁻¹, а продолжительность обработки составляла 1-5 мин. Один цикл обработки жидкости затворения состоит из двух периодически повторяющихся этапов – в кавитационном аппарате и магнитном поле. Количество циклов определяется движением ротора аппарата, создающего насосную тягу. Непосредственно после активации отбирали пробы жидкой фазы с целью проведения химического анализа. Электрокинетические характеристики дисперсной фазы оценивали с помощью прибора *Zetasizer Nano ZS* (Англия). В замесах использовали мордовский портландцемент М500-Д0, исходную и активированную водопроводную воду с добавками $CaCl_2$ и $Na_2S_2O_3$. Концентрации растворов выбирали на основании статистической обработки экспериментальных данных и анализа свойств цементных композиций. На дифрактометре ДРОН-2 с использованием $CuK\alpha$ -излучения (при $\lambda = 1,5417737 \text{ \AA}$) проводили рентгенофазовый анализ (РФА) образцов цементного камня; затем определяли прочность на сжатие полученных образцов бетона. Оценка пористости и удельной поверхности образцов цементного камня осуществлена методом низкотемпературной (77 К) адсорбции и десорбции паров азота на газовом сорбционном анализаторе *NOVA Series 1200e*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами выявлено, что обработка воды в кавитационном аппарате с магнитом в различных режимах приводит во всех опытах к изменению водородного показателя pH , однако его зависимость от интенсивности перемешивания и времени активации носит полиэкстремальный характер, что интерпретируется как следствие резонансных переходов в растворах.

Химический анализ проб активированной воды зафиксировал снижение жесткости по кальцию с 1,65 до 1,62 мг-экв/дм³, а также содержанию катионов: Ca^{2+} – с 33,0 до 32,5 мг/дм³, Mg^{2+} – с 15,2 до 13,7 мг/дм³, а Fe^{3+} – с 390 до 280 мг/дм³ (на 28%) Такой результат, вероятно, вызван процессом образования в растворах малорастворимых соединений.

Удельная электропроводность обработанной воды, испытывая определенные флуктуации, тем не менее, имеет тенденцию к возрастанию (от 12 до 15,2 мСм/см) по мере увеличения времени активации. Следует отметить, что эффекты магнитной обработки более ярко проявляются в случае воздействия на водопроводную воду по сравнению с дистиллированной [1, 16]. Данный факт свидетельствует в пользу гидратационного подхода к объяснению эффектов влияния магнитного поля на анализируемые водные растворы.

Результаты механомагнитной активации (ММА) растворов $Na_2S_2O_3$ и $CaCl_2$ и электрохимические свойства таковых представлены в таблице. Анализ табличных данных показывает, что механомагнитная обработка изучаемых растворов неодинаково влияет на удельную электропроводность. Если таковая для раствора хлорида кальция возрастает, то в растворе тиосульфата натрия (7,14 г/л) она, напротив, снижается. При этом величина электрокинетического потенциала увеличивается в обоих случаях. Появление при этом наноразмерных частиц (5...10 нм и 10...100 нм) свидетельствует о наличии центров кристаллизации, механизмы образования которых различаются. Рост электропроводности и ζ -потенциала, наблюдаемый для раствора хлорида кальция, обусловлен преобразованием $CaCl_2$ в гидроксид в результате взаимодействия с формами кислорода, присутствующими в активированной жидкости, и вытеснения хлорид-ионов из диффузного слоя.

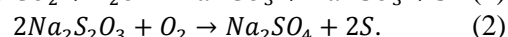
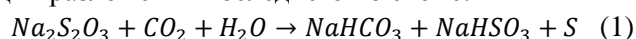
Пониженное, по сравнению с другими образцами, значение ζ -потенциала стимулирует образование твердых частиц, в частности, $CaCO_3$, выполняющих функции центров кристаллизации, ускорения схватывания цементных паст, а также регулирования структуры цементного камня.

Таблица

Электропроводность, электрокинетический потенциал и фракционный состав жидкости затворения
Table. Electrical conductivity, electrokinetic potential and fractional composition of a mixing fluid

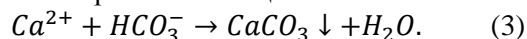
| Жидкость затворения | Электропроводность, мСм/см | Дзета-потенциал, мВ | Фракционный состав | |
|--|----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| | | | размер фракций, нм | относительный объем фракций, % |
| исходный раствор $Na_2S_2O_3$ (7,14 г/л) | 7,28 | -17,4 | 5...10 | отсутствуют |
| | | | 10...100 | 49,5 |
| | | | 100...1000 | 50,5 |
| | | | >1000 | отсутствуют |
| активированный раствор $Na_2S_2O_3$ (7,14 г/л) | 6,64 | -19,0 | 5...10 | 26,3 |
| | | | 10...100 | 70,9 |
| | | | 100...1000 | 0,3 |
| | | | >1000 | 2,5 |
| исходный раствор $CaCl_2$ (50,4 г/л) | 48,36 | 3,3 | 5...10 | отсутствуют |
| | | | 350...1000 | 73,8 |
| | | | >1000 | 26,2 |
| | | | | |
| активированный раствор $CaCl_2$ (50,4 г/л) | 76 | 5,9 | 5...10 | 100 |

Активирующее механомагнитное действие на тиосульфат натрия проявляется в интенсификации разложения последнего по схеме:



Анионы HCO_3^- , HSO_3^- и SO_4^{2-} , имеющие достаточно большой размер, формируют диффузионный слой и способствуют возрастанию ζ -потенциала. Это согласуется с представлениями о модифицированной гидратации структурно-разупорядочивающих ионов CO_3^{2-} под действием магнитного поля [10, 17] или температуры [18].

С учетом электрохимического ряда активности металлов, ионы Ca^{2+} вытесняют ионы Na^+ с образованием карбоната кальция:



Вследствие более высокого ζ -потенциала в активированном растворе $Na_2S_2O_3$ дольше сохраняются наноразмерные фракции, чем в растворе $CaCl_2$.

По данным РФА, характерной особенностью дифрактограмм образцов цементного камня, приготовленного на активированных растворах

(рис. 1, б и в), является снижение рефлекса портландита $d_n = 4,91$, которое можно объяснить образованием других соединений кальция, в частности, $CaCO_3$. Рефлексы кальцита $d_n = (3,03; 2,28; 1,87; 1,60)$ характерны для всех образцов, представленных на рис. 1. При этом дифрактограммы таковых, приготовленных на активированной воде с растворенными в ней добавками хлорида кальция и тиосульфата натрия (рис. 1, б и в), дополнительно содержат рефлексы арагонита $d_n = (3,39; 3,28; 1,97; 1,87; 1,81)$. Полученные результаты хорошо согласуются с [8]. Кроме того, РФА образцов цементного камня [19] показал, что в результате цикловой магнитной активации воды, используемой для приготовления бетона, в цементном камне кальцит не образуется – в отличие от образца, представленного на рис. 1а. Данные об образовании арагонита отсутствуют, что может быть связано с возможностью внедрения карбонат-ионов в AFm- или в AFt-фазу. На дифрактограмме контрольного образца (рис. 1а) присутствуют рефлексы этtringита $d_n = (5,60; 3,47; 2,78)$, имеющего структурную формулу $Ca_6[Al(OH)_6]_2[SO_4]_3 \cdot 26H_2O$.

Дифрактограммы образцов, приготовленных на активированных водных растворах, включают рефлексы, которые в значительной степени свойственны кристаллогидратам, содержащим CO_3^{2-} или SO_4^{2-} -анионы: татариниту $Ca_3(Al, Si)[SO_4]_{0,7}[B(OH)_4]_{0,7}(OH)_6 \cdot 12H_2O$ с $d_n = (9,61; 5,57; 3,85; 2,74; 2,18)$, скоутиту $Ca_7Si_6O_{18}CO_3 \cdot 2H_2O$ с $d_n = (2,96; 2,77; 2,49)$, фукалиту $Ca_4Si_2O_6[CO_3](OH)_2$ с $d_n = (3,08; 1,92; 1,76; 1,75)$, рапидкрикиту $Ca_2SO_4CO_3[H_2O]_4$ с $d_n = (3,86; 3,85; 3,11)$, алюмогидрокальциту $CaAl_2[CO_3]_2(OH)_4 \cdot 4H_2O$ с $d_n = (7,27; 5,16; 2,06; 1,68)$.

Со временем структура бетона, приготовленного на MMA растворах, становится более «тонкой» [1]. Данный факт можно трактовать с позиции адсорбции ионов Ca^{2+} и CO_3^{2-} по теории объемного заполнения пор, что приводит к частичной коагуляции последних. В пользу этого говорит уменьшение размеров пор и выравнивание распределения объема поровых пространств [16] и удельной поверхности пор по их размеру (рис. 2).

Воздействие магнитного поля на цементно-водную систему приводит к повышению содержания карбоната кальция в цементном камне, при этом прослеживается корреляционная зависимость между напряженностью магнитного поля и количе-

ством $CaCO_3$ [20]. Нами установлено, что увеличение содержания $CaCO_3$ в цементном камне наблюдается и при механомагнитной обработке жидкости затворения, не содержащей цемента.

В результате уплотнения цементной матрицы цементный камень и бетон, приготовленный на активированной жидкости затворения, упрочняется и становится более морозоустойчивым по сравнению с традиционным. Предел прочности на сжатие цементного камня, полученного на не активированной воде, составляет 42,5 МПа; у образцов, приготовленных на активированных растворах тиосульфата натрия и хлорида кальция, этот пока-

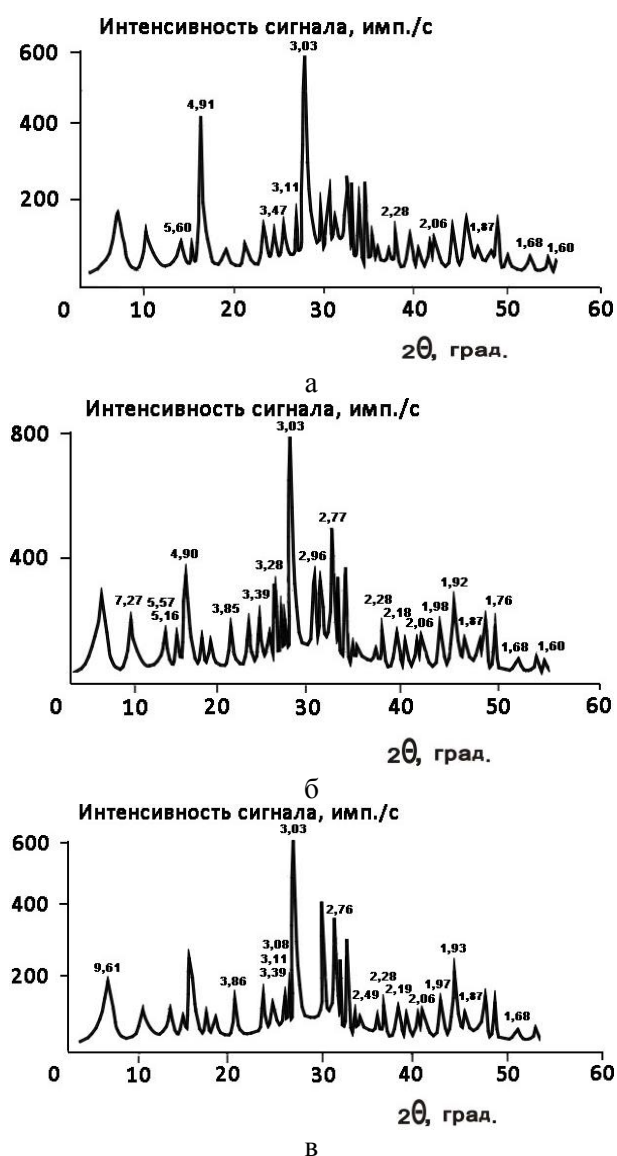


Рис. 1. Дифрактограммы контрольного образца цементного камня (а) и образцов, приготовленных на MMA растворах $Na_2S_2O_3$ (б) и $CaCl_2$ (в)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of control sample of a cement stone (a) and samples prepared on MMA $Na_2S_2O_3$ (б) and $CaCl_2$ (в) solutions

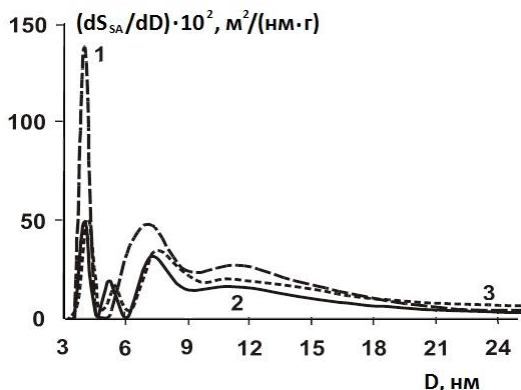


Рис. 2. Распределение удельной поверхности пор $(dS_{SA}/dD) \cdot 10^2$ по размеру в контрольном образце (1), образцах на MMA растворах $CaCl_2$ (2) и $Na_2S_2O_3$ (3)

Fig. 2. The distribution of the specific surface area of pores $(dS_{SA}/dD) \cdot 10^2$ according to the size of pores D: 1 – reference sample; 2 – sample on MMA solution of $CaCl_2$; 3 – sample on MMA $Na_2S_2O_3$ solution

затель составляет 46,5 и 55,4 МПа соответственно (на 9-30% выше, чем при испытании контрольного образца). В свою очередь, морозостойкость цементного камня, полученного на активированных растворах хлорида кальция и тиосульфата натрия, возрастает соответственно на 32 (60 циклов замораживания-оттаивания) и 55% (105 циклов замораживания-оттаивания) по сравнению с контрольным образцом, выдерживающим лишь 190 циклов.

ВЫВОДЫ

В результате предварительной механомагнитной активации воды затворения, содержащей $CaCl_2$ и $Na_2S_2O_3$, в цементном камне снижается содержание портландита, при этом кристаллизуется как кальцит, так и арагонит. По нашему мнению, арагонит, являясь менее устойчивой формой, чем кальцит, частично внедряется в структуру кристаллогидратов, образуя соединения с включением анионов CO_3^{2-} , следы которых присутствуют на дифрактограммах образцов с участием активированных растворов. При введении хлорида кальция в воду катионы Ca^{2+} , взаимодействуя с CO_3^{2-} , образуют дополнительные центры кристаллизации, а при наличии в растворе тиосульфата натрия ионы кальция замещают натрий. Вероятно, именно этот процесс, а не структура водородных связей, объясняет значительное влияние механомагнитной обработки на физико-химические свойства водопроводной воды по сравнению с дистиллированной и выявляет перспективы использования жесткой воды с целью затворения бетонных смесей.

Активация жидкости затворения обеспечивает появление активных форм кислорода, анионов

CO_3^{2-} , нанопузырьков CO_2 , наноразмерных фракций дисперсной фазы растворенных веществ, стимулирующих реакции гидратации цемента и благоприятные условия для зародышеобразования. Увеличение ξ -потенциала дает возможность консервации наноразмерных фракций в активированной жидкости, которые в стесненных условиях после затворения цементной пасты проявляют повышенную активность.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Azharonok V.V., Belous N.K., Rodtsevich S.P., Koshevar V.D., Goncharik S.V., Chubrik N.I., Orlovich A.I.** High-frequency magnetic-pulse treatment of water as a method of improving the technological properties of fine concretes. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2009. V. 82. N 6. P. 1102-1103. DOI: 10.1007/10891-010-0311-9.
2. **Sabapathy Y.K., Sooray K., Krishna L.K.S., Nithish V., Varadan S.V.** A study on influence of magnetic water on the strength characteristics of concrete. *RJPBCS.* 2019. V. 10. N 3. P. 247-252. DOI: 10.33887/rjpbs/2019.10.3.31.
3. **Mazloom M., Miri S.M.** Interaction of magnetic water, silica fume and superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *ACC.* 2017. V. 5. N 2. P. 87-99. DOI: 10.12989/acc.2017.5.2.087.
4. **Рыженко А.В., Рыженко В.Х., Ланкин С.В.** Применение методов домолла цемента и омагничивания воды для улучшения электромеханических свойств строительных бетонов. *НИЖК.* 2016. № 8(50). С. 86-89. DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.074. **Ryzhenko A.V., Ryzhenko V.H., Lankin S.V.** Using of methods of the cement re-crushing and water magnetization to improve the electromechanical properties of building concrete. *MNIZh.* 2016. N 8(50). P. 86-89 (in Russian). DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.074.
5. **Gholizadeh M., Arabshahi H.** The effect of magnetic water on strength parameters of concrete. *JETR.* 2011. V. 3. N 3. P. 77-81. DOI: 10.3923/rjsci.2011.66.69.
6. **Кузнецова С.Ю.** Магнитные свойства воды. *Усп. совр. естествозн.* 2010. № 10. С. 49-51. **Kuznetsova S.Yu.** Magnetic properties of water. *Usp. Sovr. Estestvozn.* 2010. N 10. P. 49-51 (in Russian).
7. **Kronenberg K.** Experimental evidence for the effects of magnetic fields on moving water. *IEEE T. Magn.* 1985. V. 21. N 5. P. 2059-2061. DOI: 10.1109/TMAG.1985.1064019.
8. **Knez S., Pohar C.** The magnetic field influence on the polymorph composition of $CaCO_3$ precipitation from carbonized aqueous solutions. *J. Colloid Interface Sci.* 2005. V. 281. P. 377-388. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.08.099.
9. **Alimi F., Tlili M., Ben Amor M., Maurin G., Gabrielli C.** Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions. *Электрон. обработка материалов.* 2009. N 1. P. 65-72. DOI: 10.1016/j.desal.2006.02.064.
10. **Gorlenko N.P., Sarkisov J.S., Laptev V.I., Sidorenko G.N., Kulchenko A.K.** Regulation of confining liquid for cement systems properties by means of electromagnetic fields. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2015. V. 71. P. 012008.
11. **Wang Y., Wang X., Yang Z.** Study on impermeability mechanism of magnetic water concrete. *Appl. Mech. Mater.* 2011. V. 99-100. P. 745-748. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.745.

12. Toledo E.J.L., Ramalho T.C., Magriotis Z.M. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *J. Mol. Struct.* 2008. V. 888. N 1-3. P. 409-415. DOI: 10.1016/j.molstruct. 2008.01.010.
13. Kugaevskaya S.A., Safronov V.N., Ermilova T.A., Abzaev Y.A., Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P. Effect of mixing water magnetjc activation cicle on cement stone structure. *IOP Conf. Ser.: Mater.Sci. Eng. Adv. Mat. Construct. Eng.* 2015. V. 71. P. 012-013.
14. Фомичев В.Т., Ерофеев В.Т., Емельянов Д.В., Матви-евский А.А., Митина Е.А. Влияние электродных реакций в процессах электромагнитной активации природной воды на свойства бетона. *Фундаментал. исслед.* 2015. № 4. С. 145-151. Fomichyov V.T., Erofeyev V.T., Emel'yanov D.V., Matvi-yevskiy A.A., Mitina G.A. Influence of electrode reactions in the processes of electromagnetic activation of natural water on concrete properties. *Fundamental. Issled.* 2015. N 4. P. 145-151 (in Russian).
15. Viten'ko T.N., Gumnitskii Y.M. A Mechanism of the acti- vating effect of hydrodynamic cavitation on water. *J. Water Chem. Technol.* 2007. V. 29. N 5. P. 231-237. DOI: 10.3103/S1063455X07050037.
16. Koksharov S.A. Bazanov A.V., Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. Condition of the mechanoactivated calcium chloride solution and its influence on structural and mechanical characteristics of cement stone. *Eur. Chem.-Technol. J.* 2015. V. 17. P. 327-333. DOI: 10.18381/ectj277.
17. Mosin O., Ignatov I. Basic concepts of magnetic water treat- ment. *Eur. J. Mol. Biotech.* 2014. V. 4. N 2. P. 72-85. DOI: 10.13187/ejnr.2014.4.187.
18. Kalnin'sh K.K., Danilov K.L., Bykov O.D., Fokin G.A. Termo- chemical Transformations of Hydrocarbonate Ions in Aqueous So- lutions. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 9. P. 1529-1534. DOI: 10.1134/S1070427210090041.
19. Абзаев Ю.А., Саркисов Ю.С., Сафронов В.Н., Гор- ленко Н.П., Кугаевская С.А., Ковалева М.А., Ерми- лова Т.А. Влияние цикловой магнитной обработки воды затворения на структурное состояние фаз цементного камня в различные сроки твердения. *Вестн. ТГАСУ.* 2016. № 1. С. 145-154. Abzaev Yu. A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Kugayevskaya S.A., Kovalyova M.A., Ermilova T.A. The influence of cyclic magnetic treatment of mixing water on the structural state of the phases of cement stone in various periods of hardening. *Vestn. TGASU.* 2016. N 1. P. 145-154 (in Russian).
20. Soto-Bernal J.J., Gonzalez-Mota R., Rosales-Candelas I., Ortiz-Lozano J.A. Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cem- ent Pastes. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015. V. 2015. P. 1-9. DOI: 10.1155/2015/934195.

Поступила в редакцию 11.02.2019
Принята к опубликованию 23.09.2019

Received 11.02.2019
Accepted 23.09.2019