

АКУСТО-РАДИОВОЛНОВАЯ АКТИВАЦИЯ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

В. В. Ажаронок*, С. В. Гончарик*, Н. И. Чубрик*, Н. Х. Белоус**, С. П. Родцевич**,
В. Д. Кошевар**, В.В. Рубаник***, О.Н. Махановская***, А.И. Орлович****

**Институт физики НАН Беларуси,*

пр. Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь, azharonok@imaph.bas-net.by

***Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси,*

ул. Сурганова, 9, г. Минск, 220072, Республика Беларусь, tavgen@igic.bas-net.by

****Институт технической акустики НАН Беларуси,*

пр. Людникова, 13, г. Витебск, 210023, Республика Беларусь, ita@vitebsk.by

*****Белорусский национальный технический университет,*

пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, v.orlovich@dragon.bas-net.by

Введение и постановка задачи

Несмотря на широкое применение керамики и полимерных материалов, бетон на портландцементном связующем остается одним из основных материалов современной строительной индустрии. Увеличение прочности, плотности, коррозионной стойкости бетона позволяет продлить срок службы изготавливаемых из него строительных конструкций, снижая этим эксплуатационные расходы по содержанию возводимых зданий и сооружений.

Одним из наиболее важных этапов формирования бетонов, определяющим качество изготавливаемых строительных изделий, является приготовление бетонных смесей. Любая технология, позволяющая экономить компоненты бетонных смесей, исключая или упрощая какие-либо технологические операции их приготовления, дает возможность сократить финансовые затраты или при тех же затратах увеличить объем строительства.

В настоящее время, наряду с химической модификацией портландцементных систем путем введения в них органических и минеральных добавок, интенсивно разрабатываются методы физической обработки воды затворения [1–3]. Последнее связано с тем, что присутствующая в бетонной смеси вода является ее наиболее активной составляющей [4, 5]. Образуя физико-химические связи и адсорбционные контакты, вода задает скорость и глубину гидратации цемента, условия формирования и твердения цементного камня, темпы набора прочности бетона, которые влияют в конечном итоге на стоимость строительных конструкций [6, 7]. В свою очередь известно, что активность воды зависит от ее энергетического состояния и разного рода физические воздействия на воду интенсифицируют протекающие с ее участием процессы. В частности, магнитная, электромагнитная или акустическая обработка воды приводит к изменению ее ионного состава, величины показателя активности ионов водорода, вязкости, поверхностного натяжения и удельной электрической проводимости. При этом вода приобретает высокую химическую и гидратационную активность, результатом чего является возможность направленного регулирования технологических свойств затворяемых с ее использованием цементных систем.

Одним из перспективных способов управления твердением и свойствами портландцементных бетонов считается магнитная обработка (МО) воды затворения в постоянном магнитном поле [8, 9], в результате которой происходит изменение ориентации гидратных ионных оболочек растворенных в воде солей, величины адсорбции поверхностно-активных добавок, а также формируются высокоплотные мелкокристаллические цементные структуры [10–12]. Максимальное влияние магнитной обработки воды на ее свойства наблюдается при развитии микротурбулентном течении водного потока через неподвижную зону воздействия или же перемещении зоны магнитного воздействия относительно объема воды, то есть условием усиления эффекта активации является движение потока воды перпендикулярно постоянному магнитному полю. При этом в процессе движения воды в магнитном поле происходит ее разупорядочение с увеличением энтропии и структурной температуры [13]. Отмечено [14], что управлять свойствами воды и, как следствие, затворяемых с ее использованием бетонов можно путем варьирования напряженности и конфигурации поля, а также скорости

водного потока. В работах, посвященных выбору режимов магнитного воздействия, определена оптимальная величина напряженности постоянного магнитного поля $H \approx 155\text{--}170$ кА/м и скорости движения воды относительно поля $V \approx 1$ м/с [2, 3]. Результатами использования активированной таким образом воды затворения являются формирование мелкокристаллической структуры бетонов, увеличение их ранней прочности в среднем на 20–40%, величин конечной прочности на 12–18%, повышение подвижности и сохраняемости бетонных смесей [9–11]. Кроме этого, авторами [12] делается вывод о перспективности введения в воду перед воздействием магнитного поля «стабилизаторов» магнитного эффекта – поверхностно-активных веществ, которые могут обеспечивать улучшение технологических свойств бетонов (увеличение прочности, плотности, морозо-, соле- и водостойкости).

С учетом концепции ресурсоэнергосбережения наиболее технологически доступной и экономически целесообразной является низкоэнергетическая активация воды и портландцементных систем под воздействием слабых электромагнитных полей. Известно, что водные системы могут иметь аномально повышенную чувствительность к слабым переменным полям в диапазоне низких частот [13, 14]. Уменьшение напряженности магнитного поля при обработке воды может вызывать сильный, неаддитивный отклик в системе [13], причем для каждой системы существует свой оптимальный режим воздействия. Полученные нами результаты показали приемлемость для активации воды затворения слабоинтенсивного ($H \approx 600$ А/м) переменного магнитного поля с частотой $f = 5,28$ МГц и позволили заключить, что наиболее эффективно этому воздействию подвержена водопроводная вода, содержащая достаточно большое количество примесей пара- и диамагнитной природы [15]. Следует, однако, отметить, что, несмотря на многолетние и достаточно многочисленные исследования в этом направлении, основные механизмы такой активации до сих пор остаются невыясненными.

Число работ, посвященных изучению влияния акустических воздействий на свойства воды, невелико [16–18]. Авторами выполненных исследований отмечено, что независимо от природы растворенных в воде веществ при ее акустической обработке наблюдаются повышение показателя активности ионов водорода, снижение общей жесткости воды, изменение ее плотности, электропроводности, диэлектрической проницаемости, поверхностного натяжения, увеличение числа свободных ионов и радикалов. Работы по применению активированной в звуковом поле воды в качестве жидкости затворения строительных композиций (бетонов, различного рода керамик, гипсовых материалов) также немногочисленны. Вместе с тем отмечено [19], что применение ультразвука приводит к разрушению исходной коагуляционной структуры формовочной массы, а также позволяет воздействовать на дисперсную систему как в макрообъеме, так и на микроуровне, что дает возможность рассматривать ультразвук в качестве эффективного инструмента управления процессами, протекающими на границе раздела фаз. В частности, этими авторами установлено увеличение подвижности бетонных смесей, полученных при введении в них активированной ультразвуком воды, формирование мелкопористой и однородной структуры цементного камня, возрастание его прочности при сжатии на 30–37%, прочности при изгибе на 35–38%, адгезии бетонов на 20–28%, повышение морозостойкости к циклическому замораживанию-оттаиванию. В работе [20] показано, что оптимальными величинами удельной ультразвуковой мощности, обеспечивающей эффективность активации воды затворения бетонов (повышение удобоукладываемости бетонных смесей и прочности бетонов), является диапазон от 3 до 40 кВт/ч на кубометр воды.

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что последствия влияния комплексного воздействия на воду магнитного поля и ультразвука не аддитивны, а характеризуются синергетическим эффектом. Однако результатов целенаправленных исследований в этом направлении нами не выявлено.

В связи с вышеизложенным задача настоящей работы – исследование влияния комплексного акусто-радиоволнового воздействия на степень активации водопроводной воды и технологические свойства затворяемых с ее использованием бетонных смесей и бетонов.

Эксперимент

Принципиальная схема экспериментальной установки, использовавшейся для акусто-радиоволновой обработки воды, приведена на рис. 1.

Электромагнитное воздействие на воду проводилось на частоте $f = 5,28$ МГц. Поле было локализовано в водоохлаждаемом спиралеобразном трехвитковом индукторе с внутренним диаметром $D = 80$ мм и длиной $L = 90$ мм, подключенном в качестве индуктивной нагрузки к выходу высокочастотного генератора ВЧИ-63/5,28 ИГ-801. Перед включением установки стеклянная емкость 2, заполненная обрабатываемой водой, устанавливалась в осевую зону индуктора 3 на диэлектрическую подставку 4. Среднеквадратичные величины напряженности магнитной H и электрической E составляющих электромагнитного поля, возбуждаемые на оси индуктора, составляли 590 А/м ($B \approx 1$ мТл с по-

грешностью $\sim 6\%$) и $12\,700\text{ В/м}$ (с погрешностью $\sim 4\%$) соответственно. Амплитудные значения H и E достигали 835 А/м ($B \approx 1,5\text{ мТл}$) и $17\,960\text{ В/м}$. Погрешность воспроизведения режима работы генератора не превышала $0,5\%$, с учетом чего суммарная погрешность определения величины электромагнитного поля, действующего на образец, составляла не более 10% . Значение напряженностей полей в краевой зоне на расстоянии $\sim D/2$ от оси индуктора было оценено расчетным путем с использованием данных [21] для магнитной составляющей и отличалось от осевых значений не более чем на 15% . Следует отметить, что величина H была более чем на порядок выше фоновой индукции магнитного поля Земли ($B_z \approx 0,05\text{ мТл}$). Воздействие проводилось на воздухе при атмосферном давлении по циклограмме (рис. 2).

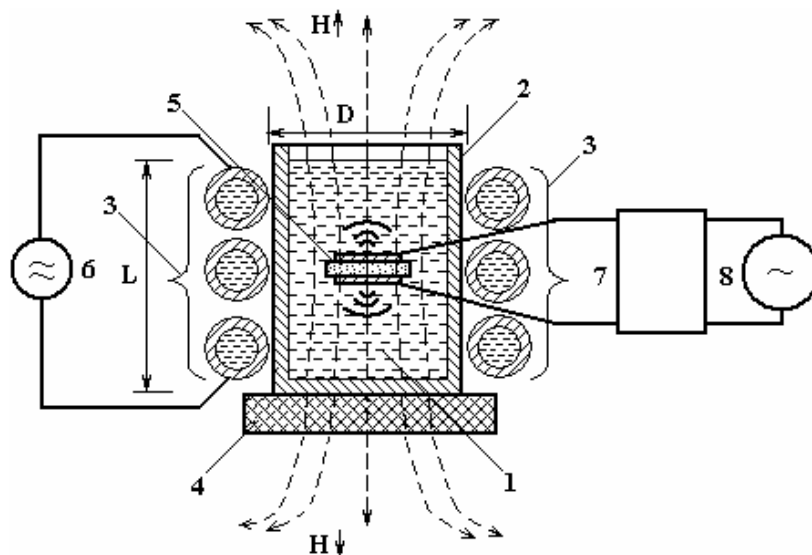


Рис. 1. Принципиальная схема акусто-радиоволновой обработки воды: 1 – вода; 2 – стеклянная емкость; 3 – охлаждаемый индуктор; 4 – диэлектрическая подставка; 5 – акустический излучатель; 6 – высокочастотный генератор; 7 – заграждающий фильтр; 8 – ультразвуковой генератор; H – силовые линии высокочастотного магнитного поля; L , D – высота и диаметр индуктора соответственно

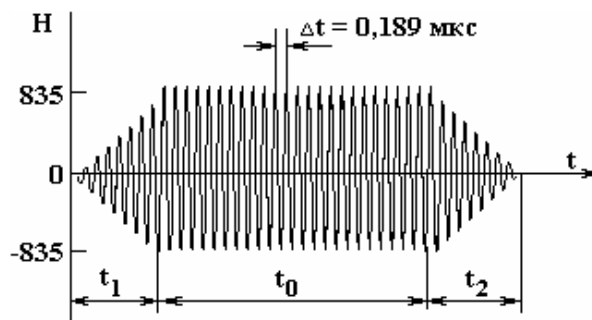


Рис. 2. Циклограмма обработки воды в высокочастотном электромагнитном поле

Длительности t_1 вывода генератора на стационарный режим генерации поля и возврата t_2 в исходное состояние в сумме не превышали 3 с . Продолжительность t_0 стационарной стадии воздействия на воду синусоидального магнитного поля с частотой $5,28\text{ МГц}$ и амплитудой 835 А/м изменялась от 1 до 16 мин , при этом нагрев воды практически отсутствовал.

Комплексная акусто-радиоволновая активация воды проводилась путем одновременного воздействия на обрабатываемый объем жидкости электромагнитного ($f=5,28\text{ МГц}$) и акустического полей. Частоты акустического поля f выбирались равными 44 кГц и 1 МГц и соответствовали резонансным частотам используемых излучателей.

Для осуществления комплексной активации внутрь заполненной водой стеклянной емкости 2 вносился акустический излучатель 5 с рабочей частотой $f=44\text{ кГц}$. В случае акустического воздействия на частоте $f=1\text{ МГц}$ применялся пьезокерамический излучатель, который был встроен в дно стеклянной емкости 2. Защита излучателей от наведенного в процессе работы генератора ВЧИ-63/5,28 ИГ-801 высокочастотного напряжения была организована с использованием загражда-

дающих LC-фильтров 7. Питание излучателей осуществлялось от специальных генераторов звуковых колебаний, изготовленных в Институте технической акустики НАН Беларуси.

Значения интенсивностей (I , Вт/м²) генерируемых акустических полей оценивались с помощью соотношения [22]:

$$I = P^2 / 2C\rho, \quad (1)$$

где P – значение создаваемого излучателем звукового давления, Па; C – скорость звука в воде, м/с; ρ – плотность воды, кг/м³.

В свою очередь амплитудная величина давления P оценивалась с использованием приведенного в [23] соотношения

$$P = 2\pi f \rho C A, \quad (2)$$

в котором f – частота акустической волны, Гц; A – амплитуда смещения торцевой поверхности излучателя, м. Следует отметить установленное авторами [23] хорошее (в пределах 15%) соответствие расчетных величин P с результатами экспериментальных измерений акустического давления, выполненных с помощью аттестованного миниатюрного гидрофона.

Результаты оценок значений P и I для используемых типов излучателей приведены в таблице. Амплитуда A смещения торцевой поверхности излучателей была определена с помощью оптического измерителя микротолщин ИЗВ-1.

Значения акустического давления P и интенсивности I акустических полей, возбуждаемых в воде при ее комплексной акусто-радиоволновой активации

f , кГц	A , м	P , Па	I , Вт/м ²
44	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^6$	$9,1 \cdot 10^5$
1000	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$

Ослабление интенсивности ультразвука в воде после прохождения расстояния длиной l , м, может быть оценено соотношением

$$I_l = I \exp(-2\alpha l), \quad (3)$$

где α – коэффициент поглощения ультразвука в воде, м⁻¹ [24].

Используя соотношение (3) и данные [24], нетрудно убедиться, что в нашем случае ($l = 0,09$ м) величина ослабления I_l / I пренебрежимо мала.

Алгоритм проводимой акусто-радиоволновой обработки был двухэтапный. Сначала обрабатываемый объем воды в течение 4 минут подвергался комплексному воздействию высокочастотного и акустического полей (первый этап). Затем акустическое поле убиралось, а вода продолжала подвергаться воздействию высокочастотного электромагнитного поля (ВЧЭМП, второй этап). Продолжительность второго этапа составляла 2 и 4 минуты.

Сразу после обработки осуществлялся контроль изменения показателя активности ионов водорода (рН) воды. Измерения рН проводили с помощью прецизионного рН-метра типа ОР-205/1 фирмы Padelkis (Budapest). Погрешность измерения не превышала 2%.

В дальнейшем необработанная и активированная вода использовалась для затворения цементно-песчаных составов на основе портландцемента М 500ДО, произведенного «ОАО Красносельстройматериалы» (г. Красносельск, РБ) [25]. Цемент характеризовался коэффициентом нормальной густоты – 0,273, началом схватывания – 160 мин, концом схватывания – 240 мин (ГОСТ 310.3). Заполнителем служил песок 1-го класса (из карьера «Крапужино» Логойского района Минской области) с модулем крупности 2,2, средней плотностью зерен 2650 кг/м³, плотностью в виброуплотненном состоянии 1746 кг/м³, удельной поверхностью 8,9 м²/кг. Перед применением песок высушивали до постоянной массы и просеивали, используя его фракции с поперечным размером 0,16–3 мм. Массовое соотношение цемента и песка в смеси составляло 1:1,5.

После затворения составов активированной и неактивированной водой были изучены подвижность и сохраняемость формируемых смесей, а также плотность и прочность при сжатии получаемых мелкозернистых бетонов.

С целью снижения водоцементного отношения, увеличения удобоукладываемости смесей, повышения плотности, прочности при сжатии бетонов, а также эффективности физической модификации воды в качестве «стабилизатора» магнитного эффекта [12] использовали поликарбоксилатный

отечественный суперпластификатор ГП-1 [26]. Введение данной добавки при небольшом ее содержании (0,2–0,3% от массы цемента) позволяет на 30% снизить водоцементное отношение цементно-песчаных смесей и существенно увеличить их подвижность и удобоукладываемость.

Подвижность (удобоукладываемость) l_n затворенных смесей и ее сохраняемость во времени оценивали по СТБ 1545-2005, определяя диаметр расплыва цементно-песчаной смеси из миниконуса, образуемого на горизонтальной поверхности сразу после приготовления смеси и последовательно через каждые 30 мин в течение 2 ч. Диаметр расплыва образцов измеряли как минимум два раза с погрешностью не более 0,1 см.

Для определения плотности ρ получаемых бетонов и их прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ из цементно-песчаной смеси формовали кубы размером 4x4x4 см и отверждали их в нормальных температурно-влажностных условиях ($T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, относительная влажность $\approx 80\text{--}90\%$). Далее образцы подвергали испытаниям в соответствии с ГОСТ 12730.1-78 (определение ρ) и ГОСТ 10 180-90 (определение $\sigma_{сж}$). При этом значения $\sigma_{сж}$ определяли как на ранних стадиях твердения бетонов (через 1 и 3 суток), так и через 7, 14, 21 и 28 суток твердения.

Погрешность определения величины подвижности не превышала 2,5%, плотности – 3%, прочности при сжатии – 3,5%.

Величины изменения ΔX контролируемых параметров рассчитывались из соотношения

$$\Delta X = \{(X - X_0) / X_0\} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где X_0 и X – показатель рН до и после акусто-радиоволновой обработки воды или подвижность l_n , плотность ρ , прочность $\sigma_{сж}$ бетонов, затворенных неактивированной и активированной водопроводной водой соответственно.

Результаты и обсуждение

Зарегистрированные изменения показателя активности ионов водорода воды в зависимости от режимов ее акусто-радиоволновой обработки представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, в отличие только от радиоволнового воздействия [15] зависимости рН воды от продолжительности комплексной акусто-радиоволновой обработки могут быть аппроксимированы достаточно гладкими кривыми. При этом более значительный рост рН имеет место на первом этапе обработки при воздействии ультразвуком частотой 1 МГц. Для второго этапа ($t \in 4\div 8$ мин) характерны замедление роста рН воды после комплексной 4-минутной акусто-радиоволновой обработки с ультразвуковой частотой 1 МГц и усиление роста при частоте ультразвука 44 кГц.

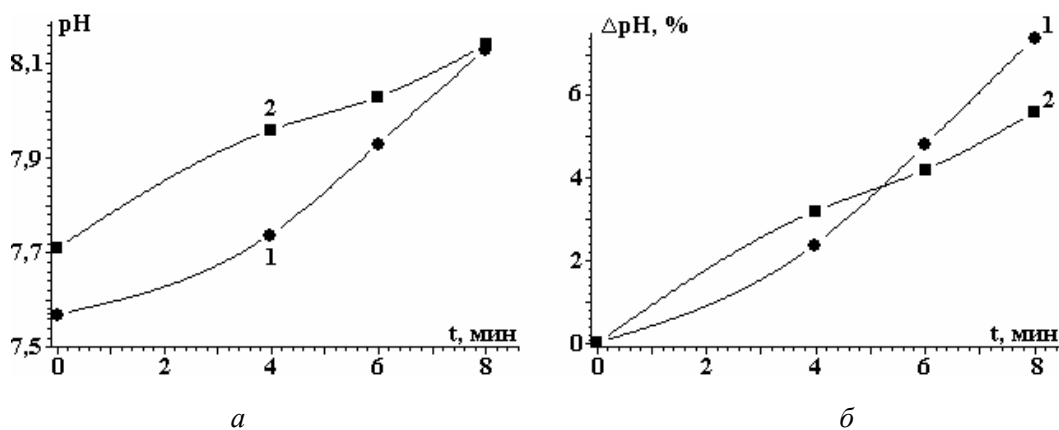


Рис. 3. Влияние продолжительности и частоты акусто-радиоволновой обработки водопроводной воды на показатель активности ионов водорода рН (а) и его изменение ΔpH (б) по отношению к неактивированной воде: 1 и 2 – комплексное акусто-радиоволновое воздействие продолжительностью 4 мин электромагнитным ($f=5,28$ МГц) и акустическим ($f = 44$ кГц и $f = 1$ МГц соответственно) полями с последующим 4-минутным воздействием только электромагнитным ($f=5,28$ МГц) полем

В отсутствие активации основной причиной изменения рН дистиллированной воды является процесс диссоциации $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ с образованием протона водорода и гидроксил-иона. В водопроводной воде значение рН может колебаться из-за диссоциации содержащихся в ней различных солей [27]. Однако величины этих колебаний даже на протяжении суток не превышают 0,2 рН [13].

При распространении в жидкостях акустических колебаний с интенсивностью, превышающей некоторое пороговое значение $I_{\text{пор}}$, наблюдается эффект кавитации, связанный с возникновением акустического давления и заключающийся в нарушении сплошности жидкости и образовании полого пространства – кавитационного пузырька, разрушение которого сопровождается возникновением

гидравлического удара силой ~ 1 ГПа и возрастанием температуры в микрообъеме жидкости \sim до 200^0 К [16, 19, 28]. Как следует из численных оценок [29], развитие кавитации в воде начинается в том случае, когда акустическое давление P превышает $3 \cdot 10^4$ Па, что соответствует пороговому значению интенсивности акустического поля $I_{\text{пор}} \sim 3,4 \cdot 10^4$ Вт/м². Экспериментально найденные значения $I_{\text{пор}}$ в килогерцовом частотном диапазоне не превышают величин порядка 10^4 Вт/м², в мегагерцовом – 10^6 Вт/м² [24, 28]. Как видно из таблицы, интенсивности I акустических полей, возбуждаемых в настоящей работе в воде при ее комплексной акусто-радиоволновой активации, значительно больше пороговых величин $I_{\text{пор}}$, то есть обработка воды происходит в кавитационном режиме.

При наличии кавитации в схлопывающемся кавитационном пузырьке развивается процесс ионизации находящихся в нем паров воды $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e$ с распадом образующихся ионов H_2O^+ по схеме $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^*$, прилипанием появившегося электрона к молекуле воды $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$ с последующей диссоциацией отрицательного иона $\text{H}_2\text{O}^- \rightarrow \text{H} + \text{OH}^-$ или же рекомбинацией электрона с ионом водорода $\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H}$ [30]. Длительность схлопывания кавитационного пузырька по порядку величины близка к полупериоду воздействующей акустической волны [30] и в нашем случае составляет $\tau_1 \sim 0,5 \cdot 10^{-6}$ и $\tau_2 \sim 0,23 \cdot 10^{-4}$ с для акустических волн с частотой $f=1$ МГц и $f=44$ кГц соответственно. Образовавшиеся же радикалы и ионы являются вполне устойчивыми частицами, и при отсутствии в системе веществ, способных с ними реагировать, могут существовать весьма долго (более 10^{-3} с), то есть после схлопывания пузырька окружающая его водная среда обогащается гидроксил-ионами OH^- и протонами H^+ .

Следует отметить, что в настоящее время считается общепризнанным более чем 50% присутствие в воде при комнатной температуре надмолекулярных образований (нанокластеров) типа $(\text{H}_2\text{O})_n$, где n – целое число от нескольких до сотен единиц [31, 32]. Причем эти структуры имеют достаточно устойчивую плоскую и трехмерную геометрию и характеризуются частотами осцилляций f килогерцового диапазона, в частности для $(\text{H}_2\text{O})_{11 \pm 1}$ величина $f \approx 22$ кГц; для $(\text{H}_2\text{O})_{100}$ – $f \approx 7$ кГц [33, 34]. Находясь в ультразвуковых полях с частотами f , близкими к частотам осцилляций, кластеры с соответствующими величинами f , по-видимому, могут разрыхляться с ослаблением структурообразующих водородных связей или разваливаться на более мелкие фрагменты.

Электромагнитное поле воздействует на присутствующие в воде протоны, гидроксил-ионы и протонсодержащие группировки, вносит изменения в структуру водородных связей в результате деполимеризации ассоциатов молекул воды с образованием моно- и димерных структур, разрушает гидратные оболочки ионов солей, приводит к разрыву старых и образованию новых водородных связей, изменяя этим величину рН.

Синергетический характер акусто-радиоволнового воздействия на воду, описанный в [2, 3], не позволяет надежно интерпретировать наблюдаемые изменения водородного показателя. Однако можно предположить, что превышение рН воды, подверженной комплексному акусто-радиоволновому воздействию с ультразвуковой частотой $f = 1$ МГц над соответствующими величинами при частоте ультразвукового воздействия 44 кГц, связано с более эффективным ее обогащением гидроксил-ионами OH^- и протонами H^+ в результате схлопывания кавитационных пузырьков, образующихся в акустическом поле на частоте $f = 1$ МГц, так как частота их схлопывания $1/\tau_1 \gg 1/\tau_2$ и, кроме этого, интенсивность поля $I_{1\text{МГц}} \gg I_{44\text{кГц}}$.

Более сильный рост рН на втором этапе ($t \approx 4 \div 8$ мин) обработки воды ВЧЭМП после 4-минутного комплексного воздействия с частотой звукового поля $f = 44$ кГц в сравнении с зависимостью при частоте звукового поля $f = 1$ МГц может быть связан с более эффективными изменениями в структуре водородных связей под действием ВЧЭМП из-за разрыхления килогерцовым акустическим полем на первом этапе обработки присутствующих в воде кластеров.

Проведенные авторами [11, 19] исследования показали, что после акустической активации воды отмечаются рост смачивания поверхности цемента, улучшение адсорбции поверхностно-активных компонентов, увеличение концентрации диффундирующих в воду из цемента ионов, что приводит к повышению удобоукладываемости и подвижности затворяемых бетонных смесей.

В выполненной нами работе [15] было установлено, что для бетонных смесей, затворенных водопроводной водой, активированной в течение 3–5 мин высокочастотным электромагнитным полем, величина подвижности l_n по сравнению с контрольными образцами увеличивалась более чем на 30%. При этом уменьшение времени активации до 1 мин, так же как и его увеличение до 8–16 мин, приводило к заметному снижению пластифицирующего эффекта бетонных смесей. Подобный пластифицирующий эффект за счет активации воды затворения в постоянном магнитном поле наблюдали авторы [9, 14], связывая его с более равномерной адсорбцией поверхностно-активных веществ,

содержащихся в жидкости затворения, на частицах цементного клинкера и поверхности формирующихся новообразований.

Применение для затворения бетонных смесей воды после ее комплексной акусто-радиоволновой обработки приводит к более значительному увеличению их подвижности и сохраняемости (рис. 4). При этом оптимальным режимом обработки является 4-минутное комплексное {ВЧЭМП(5,28МГц) + УЗ(1МГц)}-воздействие с последующей дополнительной ВЧЭМП-обработкой в течение 4 минут. В результате такого воздействия на воду увеличение подвижности бетонных смесей составляет ~45%. Уменьшение времени дополнительной ВЧ-обработки воды приводит к заметному ухудшению реологических свойств затворяемых цементно-песчаных смесей.

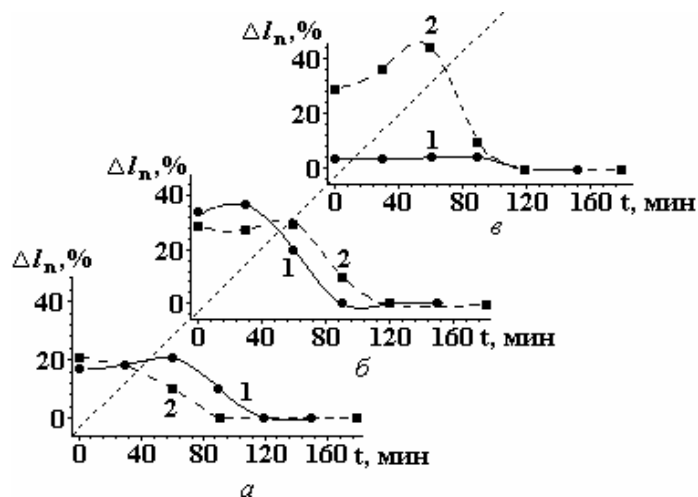


Рис. 4. Изменение во времени подвижности ΔI_n бетонных смесей, затворенных активированной водопроводной водой, при комплексном акусто-радиоволновом воздействии на воду: а – в течение 4 мин; б и в – с последующей ВЧ-обработкой в течение 2 и 4 мин соответственно; 1 – $f = 44 \text{ кГц}$, 2 – $f = 1 \text{ МГц}$

Известно, что твердение портландцементных систем проходит через стадии формирования коагуляционных, а затем конденсационно-кристаллизационных структур. На стадии существования коагуляционных структур коллоидные частицы гидратных новообразований объединяются посредством сольватных оболочек, а при образовании конденсационно-кристаллизационных структур гидратация определяется скоростью диффузии воды через оболочку новообразований. Наиболее характерной особенностью поведения активированных пересыщенных водных растворов при выделении из них кристаллической фазы является повышение дисперсности твердой фазы и однородности структурных образований по сравнению с контрольными образцами [2, 3, 9, 11, 14, 19].

Изменение свойств воды оказывает влияние на все этапы твердения цементного камня, что находит отражение в некоторых характеристиках структуры твердеющих портландцементных систем [35–37]. Зависимость изменения плотности бетонов $\rho(t)$ от продолжительности t обработки воды затворения ВЧ-полем коррелирует с изменением $pH(t)$ для данной обработки, с максимумом прироста $\Delta^{\text{max}} \rho \leq 8\%$ при времени обработки $t = 3\text{--}5 \text{ мин}$ [15]. Наиболее рыхлой структурой с низкой величиной плотности ($\rho_{\text{min}} = 1,5 \pm 0,04 \text{ г/см}^3$) характеризуются образцы бетонов, полученные на воде, активированной высокочастотным электромагнитным полем в течение 16 минут.

Как видно из рис. 5, значения плотности бетонов на активированной воде при комплексном воздействии ВЧЭМП и ультразвука частотой 44 кГц (кривые 1) более высокие, чем для портландцементных составов, содержащих неактивированную воду. Наибольший прирост плотности бетонов (~10–12%) в 7- и 28-суточном возрасте для режимов с ультразвуковой частотой 44 кГц наблюдается при 4-минутной дополнительной ВЧ-обработке (рис. 5, в).

При использовании ультразвука в мегагерцовом частотном диапазоне ($f = 1 \text{ МГц}$, кривые 2) в процессе комплексной 4-минутной акусто-радиоволновой активации в режиме проведения дополнительной 2-минутной ВЧ-обработки воды увеличение плотности бетонов до 2–3% зарегистрировано лишь на ранней стадии твердения (рис. 5, б). Другие режимы комплексного акусто-радиоволнового воздействия с использованием ультразвука частотой 1 МГц сопровождаются снижением величины плотности на 5–6%.

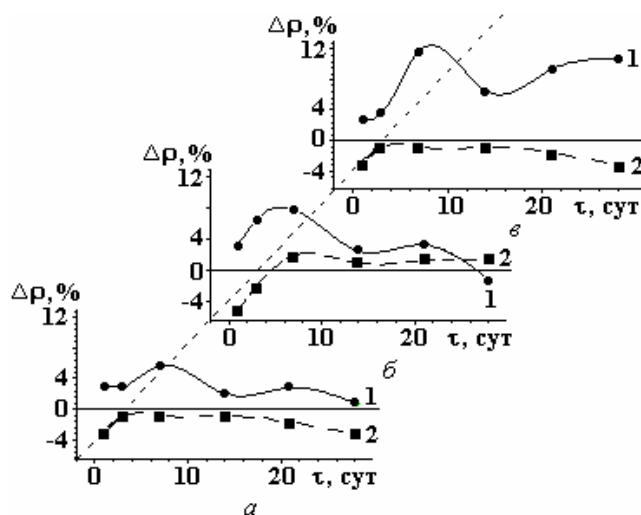


Рис. 5. Изменение плотности $\Delta\rho$ бетонов, затворенных активированной водопроводной водой при их твердении: а – комплексное акусто-радиоволновое воздействие на воду в течение 4 мин, б и в – с последующей ВЧ-обработкой в течение 2 и 4 мин соответственно; 1 – $f=44$ кГц, 2 – $f=1$ МГц

В работе [15] было отмечено, что максимальные значения прочности $\sigma_{сж}$ при сжатии бетонов характерны для портландцементных систем, содержащих воду, активированную радиоволновой обработкой в течение 3–5 мин, при этом прочность тестовых образцов в 28-суточном возрасте на 35–40% превышала прочность контрольных образцов. Кинетика изменения набора прочности бетонов при использовании воды, активированной в различных режимах комплексного акусто-радиоволнового воздействия, представлена на рис. 6.

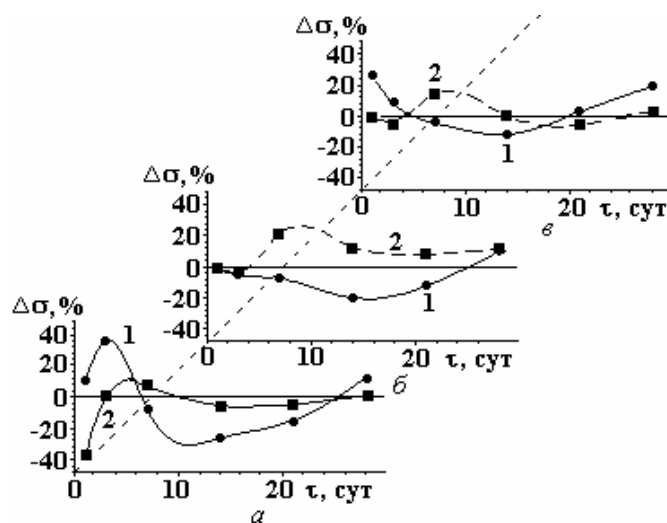


Рис. 6. Изменение прочности при сжатии $\Delta\sigma$ бетонов, затворенных активированной водопроводной водой: а – комплексное акусто-радиоволновое воздействие на воду в течение 4 мин, б и в – с последующей ВЧ-обработкой в течение 2 и 4 мин соответственно; 1 – $f=44$ кГц, 2 – $f=1$ МГц

Из приведенных данных видно, что при комплексной акусто-радиоволновой обработке воды с частотой ультразвукового поля $f=44$ кГц для двух режимов обработки (рис. 6, а, в; кривые 1) наблюдается заметное увеличение (до 40%) прочности при сжатии бетонов на ранних стадиях их твердения (1–3 сут), а также на поздних стадиях набора прочности пространственно-кристаллизационных структур в 28-суточном возрасте (до 20%). Эффект повышения прочности характерен только для бетонов, содержащих воду, обработанную в режиме 4-минутного комплексного и комплексного с последующим дополнительным 4-минутным ВЧ-воздействием. На ранних стадиях твердения бетонов, содержащих воду, активированную дополнительно ВЧ-полем в течение 2 мин, имеет место ухудшение прочностных свойств, связанное с развитием в активированной системе внутренних напряжений. Лишь в 28-суточном возрасте значения прочности при сжатии несколько превышают прочности контрольных составов.

В случае комплексной акусто-радиоволновой активации воды с частотой ультразвукового поля $f=1$ МГц на ранних стадиях твердения затворяемых бетонов наблюдается снижение прочности при сжатии, и лишь после 7 суток твердения проявляется некоторое увеличение $\sigma_{сж}$ (в среднем на 15%), причем наиболее эффективно в режиме 4-минутного комплексного воздействия с последующей 2-минутной дополнительной ВЧ-обработкой.

Таким образом, в результате выполненных исследований выявлены оптимальные режимы комплексной акусто-радиоволновой активации водопроводной воды для затворения бетонных строительных смесей. Установлено, что максимальный эффект влияния на показатель активности ионов водорода воды, сохраняемость затворяемых ею бетонных смесей, плотность и прочность при сжатии получаемых бетонов обеспечивают 4-минутная комплексная акусто-радиоволновая {ВЧ(5,28 МГц) + УЗ(44 кГц)}-обработка воды с последующим 4-минутным дополнительным ВЧ-воздействием, а также 4-минутная комплексная {ВЧ(5,28 МГц) + УЗ(1 МГц)}-обработка с последующим 2-минутным ВЧ-воздействием.

Детальный анализ причин, которые обуславливают активацию воды затворения при комплексном акусто-радиоволновом воздействии, так же как и механизмы влияния активации на процесс гидратации и структурообразования портландцементных систем, требует дальнейших систематических экспериментальных исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант №Т10-063) и Государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009 – 2010 годы и на период до 2020 года» (задания 4.1.13 – 4.1.15 мероприятия 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткина В.И., Федосов С.В., Акулова М.В. Влияние механомагнитной активации водных систем на свойства бетона. *Строительные материалы*. 2007, (11), 58–59.
2. Помазкин В.А. Физическая активация воды затворения бетонных смесей. *Строительные материалы*. 2003, (2, приложение), 14–16.
3. Помазкин В.А., Макеева А.А. Перспективные направления применения магнитной активации. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2001, (1), 109–114.
4. Тейлор Х. *Химия цемента*. М.: Стройиздат, 1996. 200 с.
5. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. *Добавки в бетон*. М.: Стройиздат, 1978. 190 с.
6. Батраков В.Г. *Модифицированные бетоны*. М.: Стройиздат, 1998. 748 с.
7. Рамачадран В.С., Фельдман Р.Ф., Каллепарди М. *Добавки в бетон*. Под ред. А.С.Болдырева, В.Б.Ратинова. М.: Стройиздат, 1988. 572 с.
8. Гранковский И. Г., Круглицкий Н.Н., Пасечник Г.А. Сочетание обработки воды затворения в магнитном поле и последующей оптимальной виброактивации для улучшения физико-механических свойств дисперсий минеральных вяжущих веществ. *Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем*. Новочеркасск: Изд-во Новочеркасского политехнического института, 1975. С. 213–217.
9. Гранковский И.Г., Круглицкий Н.Н., Пасечник Г.А. Кинетика структурообразования в водных цементных и цементно-песчаных дисперсиях под влиянием магнитного поля. *Докл. АН УССР. Сер. Б*. 1973, (8), 751–754.
10. Зеленков В.Е. Электромагнитная активация воды в процессе приготовления твердеющей закладки. *Горный журнал*. 1978, (6), 41–48.
11. Гранковский И.Г. *Структурообразование в минеральных вяжущих системах*. Киев: Наукова думка, 1984. С.58.
12. Гульков А.Н., Заславский Ю.А., Ступаченко П.П. *Применение магнитной обработки воды на предприятиях Дальнего Востока*. Владивосток: Изд-во Дальневосточн. ун-та, 1990. С. 134.
13. Семенов В.Д., Семенова Г.Д., Павлова А.Н., Саркисов Ю.С. *Электрохимически активированная вода в технологии цементных систем*. Томск: ТУСУР, 2007. 250 с.
14. Горленко Н.П. *Низкоэнергетическая активация цементных и оксидных вяжущих систем электрическими и магнитными полями*: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Томск, 2007. 46 с.
15. Ажаронок В.В., Белоус Н.Х., Родцевич С.П., Кошевар В.Д., Гончарик С.В., Чубрик Н.И., Орлович А.И. Высокочастотная магнитно-импульсная обработка воды как способ улучшения технологических свойств мелкозернистых бетонов. *Инженерно-физический журнал*. 2009, **82**(6), 1086–1092.
16. Логанина В.И., Фокин Г.А., Вилкова Н.Г. Повышение активности воды затворения цементных систем акустическим полем. *Строительные материалы*. 2008, (11), 14–16.

17. Карасева Я.А. *Повышение эффективности цементных дисперсных систем водой в метастабильном состоянии*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Пенза, 2008. 24 с.
18. Фокин Г.А., Лошканова-Карасева Я.А. Повышение физико-механических свойств цементных систем акустической активацией воды затворения. *Известия вузов. Строительство*, 2008, (4), 16–20.
19. Круглицкий Н.Н., Горovenko Г.Г., Малюшевский П.П. *Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях*. Киев: Наукова думка, 1983. 220 с.
20. Тевяшев А.Д., Шитиков Е.С. О возможности оперативного управления свойствами цементобетонов. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2010, 2(9), 44.
21. Монтгомери Д. Б. *Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов*. М.: Мир, 1971. 256 с.
22. Маргулис М.А. *Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях)*. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
23. Гривин Ю.А., Зубрилов С.П. *Кавитация на поверхности твердых тел*. Л.: Судостроение, 1985. 124 с.
24. Зубрилов С.П. *Ультразвуковая обработка воды и водных систем*. Л.: Транспорт, 1973. 100 с.
25. ГОСТ 10178-85. *Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия*.
26. Блещик Н.П. Особенности и технические проблемы новых видов конструкционных бетонов. *Строительная наука и техника*. 2005, (1), 53–60.
27. ГОСТ Р 52963-2008. *Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов*.
28. Ахвердов И.Н., Плющ Б.А., Глущенко В.М., Каплан Э.Л. *Акустическая технология бетонов*. М.: Стройиздат, 1976. 144 с.
29. Долгополов Н.Н. *Звукохимические методы в технологии строительных материалов*. М.: Госстройиздат, 1962. 209 с.
30. Шибашов А.В., Шибашова С.Ю. Изучение влияния ультразвукового поля на окислительно-восстановительный потенциал перексида водорода. *Химия и химическая технология*. 2007, 50(12), 80–82.
31. Габуда С.Н. *Связанная вода: факты и гипотезы*. Новосибирск: Наука, 1982. 68 с.
32. Moro R., Rabinovich R., Xia Ch. and Kresin V. Electric Dipole Moments of Water Clusters from a Beam Deflection Measurement. *Physical Review Letters*. 2006, 97, 123401(1)–123401(4).
33. Зубов А.В., Зубов К.В., Зубов В.А. Исследование распределения кластеров воды в овощах, фруктах и природных водах, используемых для орошения, методом спектроскопии мерцаний в шумах. *Биофизика*. 2007, 52(4), 585–592.
34. Дроздов С.В., Востриков А.А. Особенности строения и энергии малых кластеров воды. *Письма в ЖТФ*. 2000, 26(9), 81–86.
35. Гранковский И.Г., Круглицкий Н.Н. О кинетике твердения минеральных вяжущих веществ. *Докл. АН СССР*. 1970, 194(1), 147–148.
36. Каушанский В.Е. Роль свойств жидкой фазы в процессе гидратации вяжущих материалов. *Журнал прикладной химии*. 1982, 55(9), 1934–1939.
37. Бирюков А.И., Плугин А.Н., Сацук Т.Г. О роли структуры воды при гидратации цемента и кислотно-основном взаимодействии. *Тезисы докладов конференции Реализация региональной комплексной научно-технической программы «Бетон»*. Харьков, 1983. С. 53–56.

Поступила 20.01.11

Summary

Influence of complex acoustic-radio wave treatment of water on an index of activity of ions of hydrogen, rheological specifications prepared by a cement-sand mixtures and technological parameters of the obtained plasticized fine-grained concrete studied. Two methods used to reach the maximum influence on an index of activity of ions of hydrogen of water, mobility, keeping of the prepared concrete compounds, density and durability at compression of concrete. The first method – four -minute complex acoustic-radio wave treatment of water (high frequency (5.28 MHz) + ultra sound (44 kHz)), with the subsequent four minute additional impact of a high-frequency field. The second used method – four-minute complex treatment of water (high frequency (5.28 MHz) + ultra sound (1 MHz)) with the subsequent two-minute additional impact of a high frequency field. Assumptions about the mechanism of acoustic-radio-wave activation of water and its impact on the process of hardening and structure of Portland cement systems are stated.