

УДК 666.97.001.015:[53.09+53.06]

Н. Х. Белоус<sup>1</sup>, В. В. Ажаронок<sup>2</sup>, С. П. Родцевич<sup>1</sup>, В. Д. Кошевар<sup>1</sup>  
С. В. Гончарик<sup>2</sup>, Н. И. Чубрик<sup>2</sup>, А. И. Орлович<sup>3</sup>, В. В. Рубанник<sup>4</sup>

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАСТВОРОВ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

*Исследовано влияние режимов высокочастотного магнитно-импульсного и акустического воздействий на физико-химические свойства водных растворов поликарбоксилатных суперпластификаторов и технологические показатели пластифицированных ими мелкозернистых бетонов. Определены зависимости технологических свойств бетонов от концентрации водных растворов суперпластификаторов, содержания примесных ионов в используемой для разбавления воде и условий акусто-радиоволновой обработки. Установлены режимы активации растворов суперпластификаторов, позволяющие повысить подвижность и сохраняемость затворяемых бетонных и растворных смесей, плотность и прочность формируемых из них мелкозернистых бетонов.*

**Ключевые слова:** жидкость затворения, суперпластификаторы, электромагнитная и акустическая активация, кавитация, портландцемент, бетоны, плотность, прочность при сжатии, подвижность, показатель активности ионов водорода, поверхностное натяжение, напряжение сдвига, динамическая вязкость.

**Введение.** Потребности строительной индустрии в снижении затрат на производство бетонных изделий требуют разработки экономичных и экологически безопасных технологий получения бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками. Эффективными способами улучшения качества и снижения стоимости бетонов являются физическая и химическая активации жидкостей затворения.

Химическая активация предполагает введение в бетонные смеси органических и минеральных добавок различного функционального назначения [1, 2], физическая активация осуществляется путем внешних энергетических воздействий на жидкости затворения бетонов [3, 4]. Иногда применяются комбинированные методы, предполагающие совмещение первого и второго видов активации [5].

Наиболее распространенный вариант физического управления процессом твердения бетона — активация воды и других жидкостей затворения магнитными или акустическими полями [6, 7], поскольку практически все водные системы чувствительны к воздействию слабых переменных низкочастотных физических полей [8]. Приемлемость высокочастотных электромагнитных и акустических полей для активации водного компонента затворяемых портландцементных систем подтверждена нами в [9, 10].

В настоящее время считается, что в практическом плане активация водных систем магнитными и акустическими полями является наиболее доступным и экономически целесообразным технологическим приемом улучшения физико-механических свойств бетонов. Кроме того, установлено, что близость частот внешнего магнитного или ультразвукового воздействия к собственным частотам колебаний дискретных образований водных систем, содержащих большое количество примесных ионов, позволяет эффективно управлять процессами структурообразования бетонов, особенно на их ранних стадиях. В связи с этим для стабилизации магнитных и ультразвуковых эффектов активации используют физическую активацию водных растворов, содержащих химические добавки [1, 2, 11].

Известно, что твердение портландцементных пластифицированных бетонов — многостадийный процесс, включающий смачивание цемента и продуктов его твердения, адсорбцию на них молекул, содержащихся в добавках; растворение клинкера с образованием пересыщенных растворов, в которых осуществляется массоперенос и ионообмен: диспергирование клинкера до коллоидных частиц; образование коагуляционных тиксотропных гидратных структур и кристаллизационных контактов; рост кристаллических сростков.

В данной работе в качестве добавок использованы суперпластификаторы поликарбоксилатного типа, которые получают на основе сополимеров производных ненасыщенных органических кислот (акриловой, метакриловой, кротоновой, малеиновой, фумаровой и др.). Принцип их действия в бетонных смесях основан на

<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. Сурганова, 9; <sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси. 220072, г. Минск, просп. Независимости, 68; э-почта: azharonok@imaph.bas-net.by; <sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет. 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65; <sup>4</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси. 210023, г. Витебск, просп. Людникова, 13. Поступила 05.12.2011.

совокупности эффектов электростатического диспергирования и смещения  $\zeta$ -потенциала частиц клинкера в отрицательную область, а также стерического эффекта дефлокуляции, обусловленного гидрофобными цепями молекул поликарбоксилатных эфиров. Основными достоинствами этих добавок является высокий (выше 30%) водоредуцирующий эффект, способность обеспечивать при низких водоцементных отношениях и рабочих дозировках (~0.2–0.3% от массы цемента) пластифицирующие свойства бетонных и растворных смесей [11].

Цель настоящей работы — определить возможность применения слабоинтенсивных ( $H \approx 600$  А/м) переменных магнитных полей с частотой  $f = 5.28$  МГц и акустических полей с частотами  $f = 1.5$  кГц и  $f = 1.0$  МГц для активации вводимых в портландцементные системы водных растворов поликарбоксилатных суперпластификаторов (СП). Высокочастотная магнитно-импульсная (ВЧМИ) и акустическая обработка растворов СП изменяет поверхностное натяжение, показатель содержания водородных ионов, плотность и динамическую вязкость растворов СП и таким образом оказывает существенное влияние на все стадии твердения, структуру и механические свойства бетонов.

**Используемые материалы и эксперимент.** В качестве поликарбоксилатных суперпластификаторов в настоящей работе были использованы СП белорусского производства Стахемент-2000М и Frame Gіper, широко применяющиеся в монолитном и сборно-монолитном строительстве в Республике Беларусь. Данные СП соответствуют основным критериям эффективности для суперпластификаторов [2], а полученные при их использовании бетонные смеси характеризуются высокой удобоукладываемостью при предельных значениях коэффициентов пластификации — 0.3–0.37 [11].

При подготовке водных растворов СП их товарные концентраты разбавляли как дистиллированной водой [12], так и водой из хозяйственно-питьевого водопровода, удовлетворяющей требованиям [13].

Высокочастотное магнитно-импульсное воздействие осуществляли на экспериментальной установке, созданной на основе генератора переменного тока ВЧИ-63/5.28 ИГ-801. Применяемый режим работы генератора позволял получать в зоне воздействия (спиралеобразном водоохлаждаемом индукторе) электромагнитное поле на промышленной частоте  $f = 5.28$  МГц с напряженностями магнитной и электрической составляющих 590 А/м (с погрешностью ~6%) и 12 700 В/м (с погрешностью ~4%) [9] соответственно. Амплитудные значения  $H^* = \sqrt{2H}$  и  $E^* = \sqrt{2E}$  достигали 835 А/м и 17 960 В/м. Воздействие выполнялось на воздухе при атмосферном давлении по "ромбовидной" циклограмме [10]. Обрабатываемые растворы СП заливали в стеклянные емкости и поочередно устанавливали в фиксированную приосевую зону индуктора.

Акустическую обработку растворов СП на частотах  $f = 1.5$  кГц и  $f = 1.0$  МГц проводили в стеклянной емкости с встроенным в ее дно пьезокерамическим излучателем. Значения интенсивностей генерируемых акустических полей и амплитудных величин звукового давления оценивали, подобно [10], как

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

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

где  $c$  — скорость звука в воде, м/с,  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $f$  — частота акустической волны, Гц,  $A$  — амплитуда смещения торцевой поверхности излучателя, м.

Так же как и в [10], не учитывалось ослабление интенсивности акустической волны в разбавленных водных растворах СП в стеклянной емкости. Время магнитной и акустической обработки  $t$  составляло 2, 4, 6, 8 и 10 мин. Кроме того, проводилась комплексная акусто-радиоволновая активация растворов СП. Для этого емкость с растворами и акустическим излучателем вставлялась в индуктор генератора ВЧИ-63/5.28 ИГ-801 и осуществлялось одновременное воздействие на раствор электромагнитного и акустического полей. Защита электроники акустического излучателя от наведенного в процессе работы генератора ВЧИ-63/5.28 ИГ-801 высокочастотного напряжения была организована с использованием заграждающих LC-фильтров. Продолжительность комплексной обработки изменялась от 2 до 8 мин с интервалом 2 мин.

Оптимальная продолжительность осуществляемых воздействий на растворы СП в статическом режиме, исключаящем их движение при обработке, выбиралась интерактивным методом на основе результатов анализа полученных экспериментальных данных.

В работах [3–5] в качестве физико-химических параметров, характеризующих химическую и гидратационную активность воды и других жидкостей затворения бетонов до и после обработки магнитными или ультразвуковыми полями, использовались изменения их температуры, плотности, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, поверхностного натяжения, диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости. В настоящей работе изучены вызванные ВЧМИ и акустической обработкой изменения температуры  $T$ , плотности  $\rho$ , показателя содержания водородных ионов pH, поверхностного

натяжения  $\alpha$  и реологических характеристик водных растворов СП Стахемент-2000М и Frame Giper. Плотность измерялась с помощью набора лабораторных денсиметров при погрешности измерений  $\sim 1\%$ , показатель pH определялся на прецизионном pH метре ОР-205/1 фирмы Padelkis, Budapest с погрешностью  $\sim 2\%$ . Поверхностное натяжение контролировалось методами Дю-Нуи (метод отрыва кольца) и Вильгельми (метод втягивающейся пластинки), погрешность измерений которых не превышала  $0.4\%$ .

Сразу после ВЧМИ и акустической обработки водные растворы СП использовались для затворения цементно-песчаных смесей (ЦПС) на основе портландцемента М 500ДО (ОАО "Красносельстройматериалы", г. Красносельск, Республика Беларусь) [14]. Цемент имел коэффициент нормальной густоты 0.273, начало схватывания 160 мин и конец схватывания 240 мин [15]. Заполнителем в смесях служил песок 1-го класса (карьер "Крапужино" Логойского района, Минской области) с модулем крупности 2.2, средней плотностью  $2650 \text{ кг/м}^3$ , плотностью в виброуплотненном состоянии  $1746 \text{ кг/м}^3$ , удельной поверхностью  $8.9 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Перед применением песок высушивали до постоянной массы и просеивали, используя фракции с поперечным размером  $0.16\text{--}3 \text{ мм}$ . Массовое соотношение цемента к песку составляло  $1/1.5$ , водоцементное отношение в смесях было равным  $0.3$ . После затворения ЦПС активированными и неактивированными растворами СП были изучены подвижность  $l_n$  и сохраняемость смесей, а также плотность  $\rho^*$  и прочность при сжатии  $\sigma$  мелкозернистых бетонов.

Подвижность бетонной смеси и ее изменение во времени (сохраняемость) оценивали по [16], определяя не менее 2–3 раз диаметр расплыва цементно-песчаной смеси из мини-конуса сразу после ее приготовления и последовательно через каждые 30 мин в течение 2 ч. Погрешность определения подвижности и сохраняемости не превышала  $2.5\%$ .

Для определения плотности  $\rho^*$  бетонов и их прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  из цементно-песчаной смеси формовали кубы размером  $4 \times 4 \times 4 \text{ см}$ , которые отверждали в нормальных температурно-влажностных условиях ( $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $\sim 80\text{--}90\%$ ). Образцы подвергали испытаниям в соответствии с [17] и [18]. Была изучена кинетика набора прочности бетонов на ранних (1–3 сут после затворения) и более поздних стадиях их твердения (7, 14, 21 и 28 сут). Погрешность контроля плотности составляла  $\sim 3\%$ , а прочности при сжатии —  $\sim 3.5\%$ .

Качественный состав исходных кристаллических фаз и продуктов их гидратации на различных стадиях твердения цементного теста, а также степень его окристаллизованности контролировали с помощью дифрактометра ДРОН-2 с медным излучателем  $\text{CuK}\alpha$ .

Для цементного теста, содержащего неактивированные и активированные водные растворы СП, были исследованы величины тепловых эффектов и потери массы при термических воздействиях (дифференциальный термический ДТА- и термогравиметрический ДТГ-анализы на дериватографе ОД-103 МОМ).

**Результаты исследований.** Установлено, что высокочастотная магнитно-импульсная и докавитационная акустическая обработка разбавленных водных растворов поликарбоксилатных СП во всем диапазоне времен воздействия  $t$  не приводит к изменениям их плотности и температуры. Нагрев растворов всех концентраций до  $T = 35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит лишь после их обработки в кавитационном режиме акустического воздействия ( $f = 1 \text{ МГц}$ ) и после ВЧМИ обработок концентрированных ( $C = 30\text{--}40\%$ ) растворов СП.

Изотермы поверхностного натяжения  $\alpha$  необработанных и ВЧМИ-активированных водных растворов суперпластификатора Frame Giper, характеризующие изменение величины  $\alpha$  при повышении концентрации суперпластификатора  $C$ , приведены на рис. 1 (разбавление растворов СП осуществлялось водопроводной водой). Как видно из рис. 1 (кривая 1), суперпластификатор является поверхностно-активным веществом (ПАВ), накапливающимся в поверхностном слое раствора и приводящим к снижению его поверхностного натяжения [19]. Поверхностная активность раствора суперпластификатора обусловлена дифильным строением молекул, при котором его полярные группы втягиваются в объем, а неполярные составляющие выталкиваются на поверхность раствора, обеспечивая снижение поверхностного натяжения. Увеличение концентрации СП в необработанных

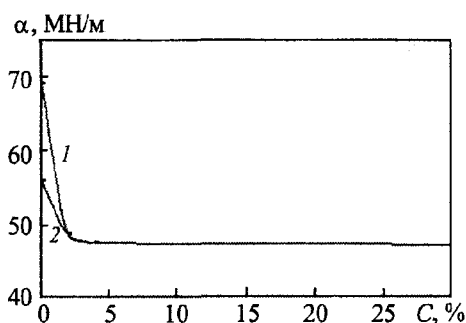


Рис. 1. Изменение коэффициента поверхностного натяжения растворов СП Frame Giper в неактивированной (1) и подвергнутой 8-минутной ВЧМИ обработке водопроводной воде (2) в зависимости от концентрации СП

разбавленных растворах ( $C = 0-2.6\%$ ), где небольшие его количества полностью адсорбируются на поверхности раствора, приводит к резкому снижению величины  $\alpha$ . При концентрациях более  $2.6\%$  большая часть поверхности раствора уже занята молекулами СП, поэтому адсорбция на границе раздела снижается и процесс снижения величины  $\alpha$  также замедляется. Большим концентрациям растворов ( $C \geq 3\%$ ) отвечает горизонтальный участок изотермы, на котором значения  $\alpha$  остаются практически постоянными, так как в этих условиях на поверхности растворов образуется сплошной мономолекулярный слой СП и дальнейшая его адсорбция затруднена.

Высокочастотная магнитно-импульсная обработка водопроводной воды и разбавленных растворов СП ( $C = 2-2.6\%$ ) приводит к снижению поверхностного натяжения в среднем на  $15-17\%$  (рис. 1, кривая 2), что обусловлено уменьшением интенсивности межмолекулярных взаимодействий и нарушением баланса молекулярных сил в поверхностном слое раствора при ВЧМИ воздействии. Для растворов с более высокой концентрацией СП заметных изменений величины  $\alpha$  после ВЧМИ обработки не наблюдалось, что, возможно, связано с полным насыщением в этих условиях их поверхностного слоя молекулами СП.

Акустическая обработка в докавитационном режиме не приводила к изменениям абсолютных величин поверхностного натяжения, так же как и обработка растворов СП в кавитационном режиме при тех же длительностях воздействия. Наблюдались лишь более существенные флуктуации значений определяемого поверхностного натяжения в параллельных экспериментах, природу которых планируется изучить более досконально в последующих работах.

При изучении влияния ВЧМИ активации на величину pH водных растворов СП, разбавленных водопроводной водой ( $C = 2-2.6\%$ ), установлено, что заметное увеличение показателя содержания водородных ионов (в среднем на  $3.5-5\%$ ) наблюдается во временном интервале воздействий  $4-8$  мин (рис. 2, а). При ВЧМИ обработке растворов, разбавленных дистиллированной водой, отмечено незначительное ( $\leq 1.5\%$ ) уменьшение величины pH (рис. 2, б). Подобно авторам [20], наблюдаемую слабую восприимчивость дистиллированной воды и растворов на ее основе к действию магнитного поля можно связать с термическим изменением их свойств в процессе дистилляции.

Акустическая докавитационная активация продолжительностью от 2 до 10 мин растворов СП в водопроводной и дистиллированной воде ( $C = 2-40\%$ ) не оказывала влияния на величину pH.

Для кавитационного режима обработки ( $f = 1$  МГц,  $t = 5$  мин) зарегистрирован рост pH всех водных растворов СП, максимальная величина которого составляла  $\sim 3\%$  для растворов СП в дистиллированной воде (рис. 2, в). Наблюдаемые особенности изменения pH водных растворов СП после их ВЧМИ и акустической обработки согласуются с результатами работы [7], в которой такой эффект объясняют разрушением близкодней-

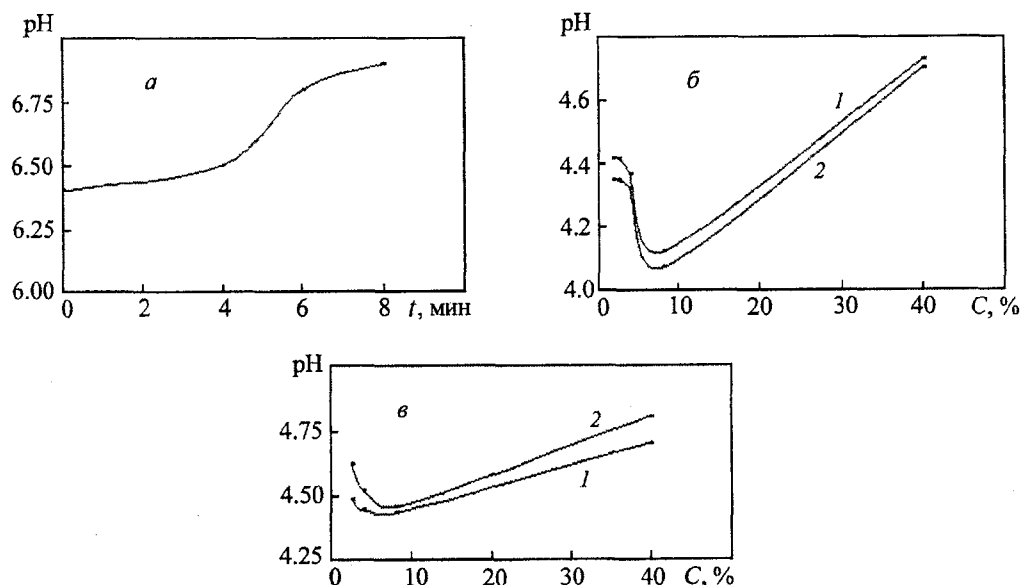


Рис. 2. Влияние продолжительности ВЧМИ обработки раствора СП Стахемент-2000 М концентрацией  $2.6\%$  в водопроводной воде на показатель активности водорода pH (а) и изменение pH растворов СП Frame Gireg в неактивированной (б и в, кривая 1) и активированной 10-минутной ВЧМИ (б, кривая 2) и 5-минутной акустической обработкой (в, кривая 2) дистиллированной воде в зависимости от концентрации СП

ствующих межмолекулярных связей в водных системах, приводящим к изменению равновесия в диссоциации кислотных и основных групп и образованию избыточного количества активных ионов ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{RCOO}^-$ ).

Время релаксации величин рН активированных водных растворов СП к их исходным значениям (до акусто-радиоволновой обработки) составляло ~24 ч.

Дериватографические исследования цементного теста, затворенного контрольными и ВЧМИ-активированными растворами СП в диапазоне температур  $T \in 20\text{--}960^\circ\text{C}$ , позволили установить температурные границы химических и физико-химических превращений, рассчитать дегидратационные изменения в образцах, оценить общую потерю массы и тепловые эффекты данной системы. Полученные результаты свидетельствуют о ступенчатом разложении продуктов гидратации цементного теста, затворенного на активированных и неактивированных водных растворах СП. Процесс сопровождается пятью эндотермическими эффектами (при  $T = 118, 470, 550, 750$  и  $960^\circ\text{C}$ ) и одним значительным экзоэффектом при  $T = 320^\circ\text{C}$ . Выявленное смещение эндозффектов в цементных системах затворенных ВЧМИ-обработанными растворами СП в более высокотемпературную область может являться следствием формирования в них продуктов с более сильными межмолекулярными связями. Об этом свидетельствует также зарегистрированное во всем температурном интервале  $T \in 20\text{--}960^\circ\text{C}$  снижение, в среднем на 15%, потери массы в данных образцах цементного теста в сравнении с цементной системой с немодифицированным раствором СП.

Активированные акусто-радиоволновым воздействием изменения физико-химических свойств растворов СП оказывают влияние на растворимость цементного клинкера в присутствии растворов СП, его смачиваемость, степень диспергирования, а также на конечные характеристики полученных материалов. Установлено, что реологические свойства цементного теста и цементно-песчаных смесей (подвижность, удобоукладываемость, сохраняемость, динамическая вязкость и напряжение сдвига) в большей степени изменяются при высокочастотных магнитно-импульсных воздействиях и комплексной акусто-радиоволновой активации при акустической частоте  $f = 1.5$  кГц. Так, например, путем применения ВЧМИ обработки разбавленных до концентраций  $C = 2\text{--}2.5\%$  растворов СП подвижность цементно-песчаных смесей может быть повышена на 30–35%, сохраняемость — на 50% (рис. 3).

Акустическая докавитационная обработка на частоте  $f = 1.5$  кГц растворов СП в дистиллированной и водопроводной воде не приводит к изменениям подвижности и сохраняемости цементно-песчаных смесей. При кавитационном режиме воздействия на растворы СП подвижность затворяемых смесей повышается на 12–15% (рис. 4). Полученные нами данные несколько расходятся с результатами работы [7], где отмечено, что в отличие от акустической активации воды ультразвуковая обработка водных растворов СП в кавитационных режимах воздействия, обуславливающих разрыв водородных и химических связей, возбуждение и ионизацию молекул воды и СП, приводит к резкому снижению подвижности и сохраняемости полученных ЦПС. Вероятно, это вызвано тем, что в нашем случае временные режимы и частоты акустического воздействия отличались от режимов воздействия [7], у которых частота ультразвуковых колебаний излучателя составляла 125–6 кГц, а продолжительность воздействия варьировалась от 1 до 6 ч.

Следует отметить наблюдаемый нами рост подвижности цементно-песчаных смесей в зависимости от продолжительности магнитной и акустической обработки растворов СП. При этом в отличие от высокочастотного

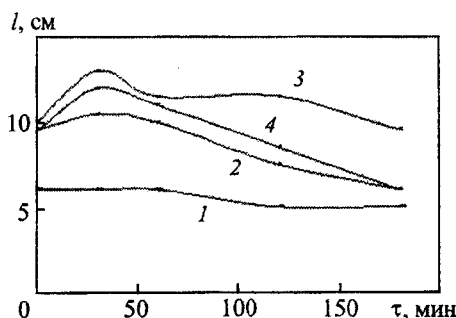


Рис. 3. Кинетика изменения подвижности ЦПС, пластифицированных неактивированным (1) и ВЧМИ-обработанным в течение 4 (2), 6 (3) и 8 мин (4) раствором СП Стахемент-2000 М концентрацией 2.6% в водопроводной воде

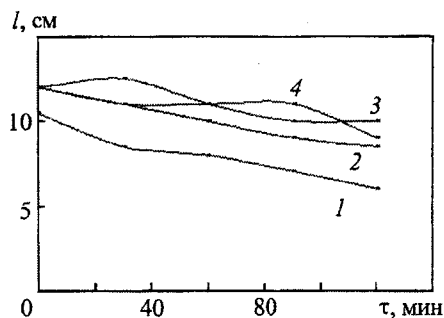


Рис. 4. Кинетика изменения подвижности ЦПС, пластифицированных неактивированным (1) и обработанным в течение 5 мин акустическим полем на частоте 1 МГц раствором СП Frame Gірег концентрацией 4 (2), 8 (3) и 2.5% (4) в дистиллированной воде

магнитного воздействия эффективность акустической активации не зависела от вида используемой для разбавления суперпластификаторов воды.

Исследования качественного состава продуктов твердения цементного теста с помощью рентгенофазового анализа показали, что обработка водных растворов СП высокочастотными магнитными полями в течение 2–10 мин приводит к снижению степени окристаллизованности основных продуктов твердения цементных систем — кальцита, алита, этtringита. Установлено, что после ВЧМИ и комплексной акусто-радиоволновой обработок растворов СП наблюдается повышение плотности  $\rho^*$  формируемых бетонов, причем в сравнении с контрольными образцами более высокими величинами плотности характеризуются бетоны, затворенные активированными разбавленными (2–4%) водными растворами СП (рис. 5, а). Оптимальным временем обработки данных растворов СП является 6–8-минутное воздействие (рис. 5, б), в результате которого увеличение плотности составляет ~10%.

Обработка водных растворов СП в докавитационном режиме акустического воздействия приводит к разрыхлению структуры бетонов и снижению их плотности по сравнению с составами, затворенными контрольными растворами СП. Приростом плотности характеризовались бетоны, затворенные 2–2.5%-ми растворами СП, активированными в течение 5 мин акустическим полем на частоте  $f = 1$  МГц. Их плотность превышала плотность контрольных образцов на 15–16% (рис. 6, кривые 2 и 3). При этом эффективность повышения плотности бетонов проявлялась при применении как водопроводной, так и дистиллированной воды для разбавления СП.

Активация водных растворов СП, способствующая возрастанию числа фазовых контактов между частицами новообразований, приводила к росту прочности кристаллизационных структур бетонов. Было установлено влияние концентрации растворов СП и продолжительности их магнитной, акустической и комплексной активации на кинетику набора прочности при сжатии бетонов. Результаты исследования прочностных свойств бетонов в основном коррелировали с изменениями величин их плотности после физических воздействий на растворы СП. При варьировании продолжительности магнитно-импульсной обработки во всем концентрационном диапазоне СП существенных изменений в прочностных свойствах бетонов, как на ранних, так и на поздних стадиях твердения, не наблюдалось. Отсутствовали также заметные проявления влияния активации при акустических воздействиях на растворы СП в докавитационном режиме. Увеличение конечной прочности бетонов

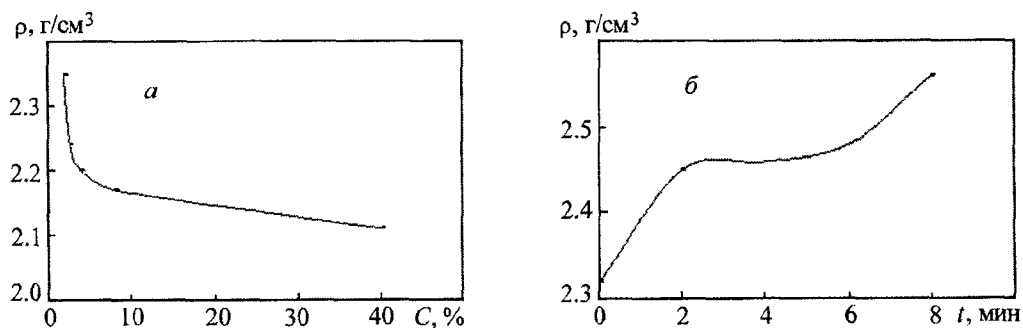
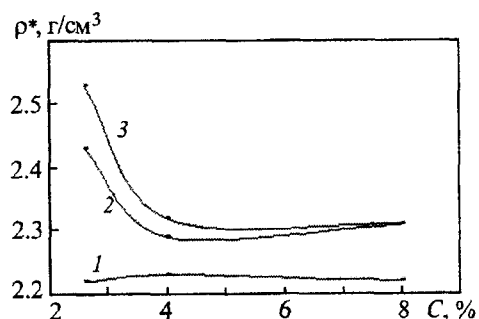


Рис. 5. Изменение плотности пластифицированных бетонов в зависимости от концентрации раствора СП Frame Giret в водопроводной воде при активации 8-минутной ВЧМИ обработкой (а) и от продолжительности акусто-радиоволновой активации на частоте 1.5 кГц 2%-го раствора СП Стахемент-2000 М в водопроводной воде (б)

Рис. 6. Изменение плотности бетонов, содержащих неактивированные (1) и активированные в течение 5 мин акустическим полем на частоте 1 МГц растворы СП Frame Giret в водопроводной (2) и дистиллированной воде (3) в зависимости от концентрации СП



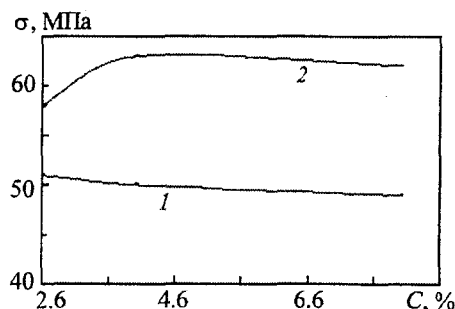


Рис. 7. Изменение конечной прочности при сжатии бетонов в зависимости от концентрации в дистиллированной воде неактивированного (1) и активированного в течение 5 мин акустическим полем на частоте 1 МГц СП Frame Giper (2)

на 19–20% имело место лишь при использовании 8-минутной комплексной активации разбавленных растворов СП. Максимальный же прирост конечной прочности мелкозернистых бетонов (около 30%) наблюдался после 5-минутной кавитационной акустической обработки разбавленных растворов СП на частоте  $f = 1$  МГц (рис. 7). Характерной особенностью данного вида обработки СП являлось то, что, как и при изучении подвижности и плотности цементно-песчаных систем, вид используемой воды на прочностные свойства бетонов существенного влияния не оказывал.

**Заключение.** В результате исследований влияния концентрации водных растворов поликарбоксилатных суперпластификаторов и продолжительности их высокочастотной магнитно-импульсной и акустической активации на реологические свойства цементно-песчаных смесей и физико-механические свойства бетонов установлено, что наиболее эффективной является акустическая обработка растворов суперпластификаторов в кавитационном режиме воздействия. Данный вид обработки приводит к повышению подвижности и сохранности цементно-песчаных смесей, росту плотности и конечной прочности при сжатии бетонов. При этом устойчивый эффект акустической активации в кавитационном режиме обработки был обнаружен при использовании для разбавления суперпластификаторов как водопроводной, так и дистиллированной воды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Т10-063 и № Т11ВТ-010).

### Обозначения

$C$  — концентрация суперпластификатора;  $E$  — напряженность электрической составляющей электромагнитного поля, В/м;  $f$  — частота электромагнитного и акустического полей, кГц, МГц;  $H$  — напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля, А/м;  $I$  — интенсивность акустического поля, Вт/м<sup>2</sup>;  $l$  — подвижность бетонных смесей, мм;  $P$  — акустическое давление, Па;  $t$  — время обработки, мин;  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения, МН/м;  $\rho$  — плотность раствора суперпластификатора, г/см<sup>3</sup>;  $\rho^*$  — плотность бетона, г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_{сж}$  — прочность бетона при сжатии, МПа;  $\tau$  — время твердения бетона, мин, сут.

### Литература

1. Фаликман В. Р., Вайнер А. Я., Башлыков Н. Ф. Новое поколение суперпластификаторов//Бетон и железобетон. 2000. № 59. С. 5–7.
2. Несветаев Г. В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетоне//Строительные материалы. 2006. № 3. С. 25–31.
3. Гульков А. Н., Заславский Ю. А., Ступаченко П. П. Применение магнитной обработки воды на предприятиях Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 1990. С. 134.
4. Касаткина В. И., Федосов С. В., Акулова М. В. Влияние механомагнитной активации водных систем на свойства бетона//Строительные материалы. 2007. № 11. С. 58–59.
5. Федосов С. В., Акулова М. В., Слизнева Т. Е., Падохин В. А., Касаткина В. И. Определение технологических параметров механомагнитной активации водных систем с пластифицирующей добавкой//Строительные материалы. 2010. № 3. С. 49–51.
6. Помазкин В. А., Макеева А. А. Перспективные направления применения магнитной активации//Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2001. № 1. С. 109–114.
7. Карасева Я. А. Повышение эффективности цементных дисперсных систем водой в метастабильном состоянии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2008.
8. Горленко Н. П. Низкоэнергетическая активация цементных и оксидных вяжущих систем электрическими и магнитными полями: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2007.

9. Ажаронок В. В., Белоус Н. Х., Родцевич С. П., Кошевар В. Д., Гончарик С. В., Чубрик Н. И., Орлович А. И. Высоочастотная магнитно-импульсная обработка воды как способ улучшения технологических свойств мелкозернистых бетонов//ИФЖ. 2009. Т. 82, № 6. С. 1086–1092.
10. Ажаронок В. В., Гончарик С. В., Чубрик Н. И., Белоус Н. Х., Родцевич С. П., Кошевар В. Д., Рубаник В. В., Махановская О. Н., Орлович А. И. Акусто-радиоволновая активация воды затворения портландцементных систем//Электронная обработка материалов. 2011. Т. 47, № 5. С. 50–59.
11. Морозов Н. М., Красникова А. М., Степанов С. В. Влияние пластифицирующих добавок на свойства песчаных бетонов//Материалы 7-й Междунар. науч.-практич. конф. "Aktualne Problemy Nowoczesn. Nauk", 7–15 июня 2011 г., Przemysł: Nauka i studia, 2011. С. 47–50.
12. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия.
13. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством.
14. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
15. ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема.
16. ГОСТ 10181.1-91. Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости.
17. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности.
18. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности.
19. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. С. 117–120.
20. Бригова А. А., Адамко И. В., Бачурина В. Л. Активация воды лазерным излучением, магнитным полем и их сочетанием//Вестн. Новгородского гос. ун-та. 1998. № 7. С. 10–15.