

УДК 666.97.001.015:[53.09+53.06]

**В. В. Азгаронок¹, Н. Х. Белоус², С. П. Родцевич², В. Д. Кошевар²,
В. Г. Шкадрцова¹, С. В. Гончарик¹, Н. И. Чубрик¹, А. И. Орлович³**

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Изучено влияние режимов высокочастотной (радиоволновой) электромагнитной обработки воды затворения на процесс структурообразования и на технологические характеристики портландцементных систем. Установлено, что радиоволновая электромагнитная активация воды приводит к снижению ее поверхностного натяжения, динамической вязкости и сдвигового напряжения, а также обуславливает интенсификацию процесса формирования коагуляционных структур в портландцементном тесте и увеличение подвижности цементно-песчаных смесей.

Ключевые слова: жидкость затворения, портландцементное тесто, бетоны, процесс структурообразования, высокочастотное электромагнитное поле, воздействие поля, напряжение сдвига, скорость сдвига, динамическая вязкость, предел текучести, подвижность, удобоукладываемость, поверхностное натяжение.

Введение. Известно, что на начальных этапах гидратации процессы структурообразования в портландцементных бетонах сопровождаются появлением пространственных коагуляционных структур, постепенно переходящих в структуры смешанного конденсационно-кристаллизационного типа [1, 2]. Авторами [3, 4] установлено, что обработка жидкостей затворения цементов магнитными полями оказывает существенное влияние на эффективность этих процессов, приводя, в конечном итоге, к улучшению физико-механических показателей получаемых строительных материалов. Применимость высокочастотной магнитно-импульсной обработки (ВЧМИО) для активации жидкостей затворения (воды и водных растворов поликарбоксилатных суперпластификаторов (СП)) портландцементных составов была показана в [5, 6]. Установлено, что введение в воду затворения добавок отечественного СП Стахемент-2000 М, представляющего собой производное полиакриловой кислоты с определенной локализацией карбоксильных групп в основной и боковых цепях, повышало эффективность ВЧМИО.

Достоинством СП Стахемент-2000 М является высокий (превышающий 30%) водоредуцирующий эффект, а также способность обеспечивать при низких водоцементных отношениях и небольших рабочих дозировках (~0.2–0.3% от массы цемента) хорошую подвижность и удобоукладываемость бетонных и растворных смесей [7]. Принцип действия СП в портландцементных составах основан на интенсивном диспергирующем эффекте, обусловленном адсорбцией СП на клинкерных частицах и новообразованиях с включением электростатического и сферического факторов устойчивости [8].

Активация затворяющих водных систем магнитными полями является доступным и экономически целесообразным приемом улучшения физико-механических свойств получаемых бетонов, в частности, позволяет эффективно управлять процессами структурообразования бетонов, особенно на ранних стадиях их формирования. Работы в этом направлении проводятся многочисленными исследователями уже достаточно продолжительное время, однако практически во всех публикациях содержится только описание макроэффектов, достигаемых воздействием магнитных полей на воду затворения портландцементных систем, без должного выяснения возможных причин наблюдаемых явлений. Цель настоящей работы — изучение реологических свойств воды затворения цементов после ее активации радиоволновыми электромагнитными полями, а также изменения структурно-механических показателей получаемого с ее использованием портландцементного теста и подвижности содержащих активированную воду цементно-песчаных смесей (ЦПС). Полученные результаты позволяют

¹Институт физики НАН Беларуси. 220072, г. Минск, просп. Независимости, 68; э-почта: azharonok@imaph.bas-net.by; ²Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. Сурганова, 9; э-почта: tavgen@igic.bas-net.by; ³Белорусский национальный технический университет. 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65. Поступила 16.04.2013.

оценить влияние стадии коллоидизации, обусловленной растворением цементного клинкера и формированием новообразований, на подвижность и удобоукладываемость растворных и бетонных цементных смесей.

Используемые материалы и эксперимент. В качестве воды затворения портландцементных составов использовали воду из хозяйственно-питьевого водопровода, удовлетворяющую требованиям из [10]. Вводимый в воду при затворении цементных составов — 30%-ый водный раствор суперпластификатора Стахемент-2000 М — соответствует ТУ ВУ 800013176.721-2010 и широко применяется в монолитном и сборно-монолитном строительстве в Республике Беларусь. Добавка СП Стахемент-2000 М включена в каталог химических добавок, разрешенных Министерством архитектуры и строительства к применению на территории РБ. Свойства добавки соответствуют основным критериям эффективности, разработанным для СП (снижение водосодержания, деформаций усадки, ползучести, повышение удобоукладываемости бетонных смесей, модуля упругости и прочностных характеристик бетонов) [9].

Радиоволновое электромагнитное воздействие на воду осуществляли на экспериментальной установке, созданной на основе высокочастотного генератора ВЧИ-63/5.28 ИГ-801 [5, 6], рабочий режим которого 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%). Воздействие выполнялось на воздухе при атмосферном давлении по циклограмме [5, 6]. Воду заливали в стеклянные емкости и устанавливали в фиксированную приосевую зону индуктора. Время ее обработки t варьировали в интервале от 1 до 10 мин. С учетом конфигурации индуктора и геометрии расположения в нем образцов можно считать, что образцы подвергались воздействию электромагнитного поля с соотношением и взаимной ориентацией магнитной и электрической компонент, характерной для так называемой "ближней зоны", формирующейся на расстояниях от источника излучения, значительно меньших длины волны электромагнитного поля.

Активированная вода была использована для получения цементного теста на основе портландцемента М 500ДО ("ОАО Красносельстройматериалы", Красносельск, РБ) [11]. Цемент характеризовался коэффициентом нормальной густоты — 0.273, началом схватывания — 100 мин, концом схватывания — 240 мин [12]. Одновременно проводились контрольные эксперименты с неактивированной водой.

Реологические свойства необработанной и активированной воды, а также цементного теста контрольного и содержащего активированную воду составов были исследованы на реометре Physica MCR-101 (измерительная система пластина–пластина) в диапазоне скоростей сдвига $D_r = 0-300$ с⁻¹ и на ротационном вискозиметре "Реотест-2" (измерительная система цилиндр в цилиндре) в диапазоне скоростей сдвига $D_r = 0.5-437$ с⁻¹ с соотношением радиусов коаксиальных цилиндров (r/R) = 0.94. В соответствии с принятым алгоритмом исследований, в начале процедуры измерений цементное тесто тщательно перемешивали в течение 10 мин, а затем заливали в измерительный объем и через 2 мин после перевода измерительной аппаратуры в заданный диапазон скоростей деформации начинали отсчет показаний реометра Physica MCR-101 или же вискозиметра "Реотест-2". После достижения максимальной величины скорости сдвига (437 с⁻¹) производили соответствующее обратному ходу ступенчатое снижение D_r до его минимального значения. С использованием полученных показаний для каждого значения D_r рассчитывали создаваемое напряжение сдвига τ и динамическую вязкость η .

Для исследования кинетики структурообразования и изучения изменения реологических свойств цементного теста во времени (через 10, 60 и 120 мин после его затворения) использовались новые порции теста, отобранные из исходной приготовленной массы, хранящейся в термостате при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 80–90%.

С целью установления корреляции между реологическими свойствами цементного теста и цементно-песчаных смесей было изучено влияние активированной радиоволновой электромагнитной обработкой воды затворения на подвижность ЦПС.

Цементно-песчаные смеси получали при введении в цементное тесто заполнителя — песок 1-го класса (карьер "Крапужино" Логойского района, Минской области) с модулем крупности 2.2, средней плотностью 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, выделяя фракции с поперечным размером 0.16–3 мм. Массовое соотношение между цементом и песком в ЦПС составляло 1/1.5, водоцементное отношение (в/ц) в смесях было равным 0.3. Подвижность ЦПС после их затворения активированной и неактивированной водой оценивалась по диаметру расплыва основания конуса из цементно-песчаной смеси [13] непосредственно после

ее приготовления и через каждые 30 мин в течение 2 ч. В каждом случае проводили не менее 2–3 параллельных экспериментов, вследствие чего погрешность измерений не превышала 2.5%.

Результаты исследований. Обычная дистиллированная и водопроводная вода являются ньютоновскими жидкостями, вязкость которых практически не зависит от градиента скорости деформации [14].

Применяемая радиоволновая электромагнитная обработка дистиллированной воды при всех длительностях воздействия не приводила к изменениям ее реологических свойств.

Результаты исследований влияния скорости сдвига на напряжение сдвига и динамическую вязкость неактивированной и обработанной радиоволновым электромагнитным полем водопроводной воды представлены на рис. 1, 2. В отличие от неактивированной воды (кривая 1 на рис. 1 и 2), вода после радиоволновой обработки приводит к изменениям формы ее реологических кривых (кривые 2–5). При всех временах обработки (от 1 до 10 мин) имело место снижение вязкости воды. Наблюдался также аномальный ход полученных реограмм, заключающийся в отклонениях измеряемых значений τ и η от соответствующих величин, характерных для ньютоновских жидкостей (кривая 1). Наиболее вероятными причинами наблюдаемых особенностей в распределениях τ и η в зависимости от скорости сдвига D_r , по-видимому, являются нестабильность образуемой слабыми водородными связями структурной сетки воды и ее разрушение при радиоволновой активации. Результаты коррелировали с данными коэффициента поверхностного натяжения σ , которые были получены методом дю Нуи, для водопроводной воды (рис. 3) до $t = 0$ и после $t > 0$ ее радиоволновой обработки. Погрешность измерений коэффициента поверхностного натяжения $\Delta\sigma/\sigma \leq 0.3\%$. Подобно τ и η при увеличении времени воздействия t на воду от 1 до 10 мин, было зарегистрировано первоначальное ($0 \leq t < 4-5$ мин) снижение величины σ с последующим переходом к практически постоянному ее значению при временах воздействия $5 < t \leq 10$ мин.

Известно, что эффективность магнитной активации воды определяется физическими условиями ее осуществления. При этом к числу факторов, играющих наиболее важную роль в процессе активации, относятся напряженность и частота воздействующего магнитного поля, а также химический состав обрабатываемой воды.

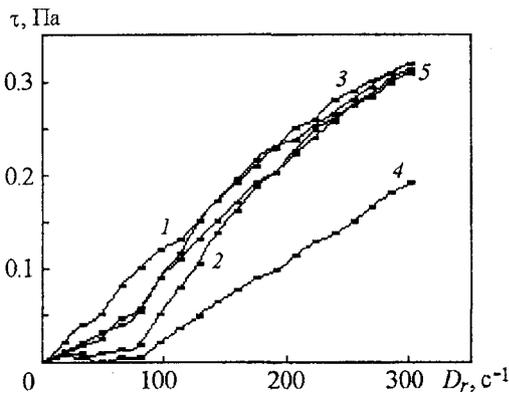


Рис. 1. Реограммы τ – D_r необработанной водопроводной воды (1) и воды, активированной ВЧМИО в течение 1 мин (2), 2.5 (3), 5 (4), 10 (5)

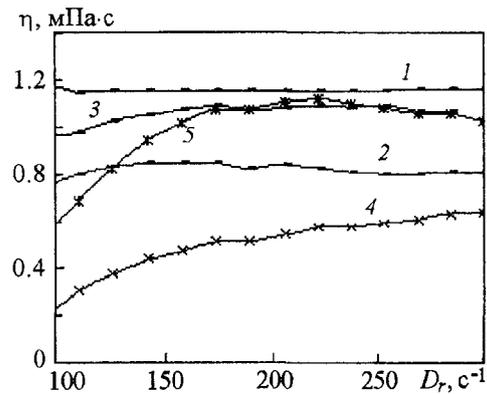


Рис. 2. Реограммы η – D_r необработанной водопроводной воды (1) и воды, активированной ВЧМИО в течение 1 мин (2), 2.5 (3), 5 (4), 10 (5)

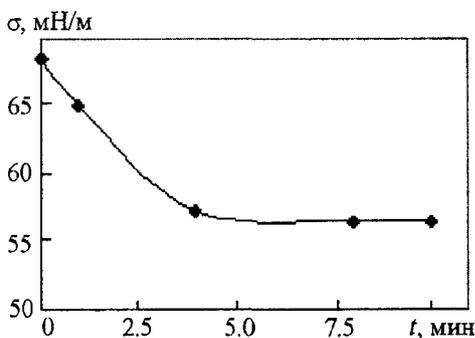


Рис. 3. Влияние длительности ВЧМИО водопроводной воды на ее поверхностное натяжение

На рис. 4 и 5 представлены зависимости, характеризующие влияние продолжительности радиоволновой активации на величины напряжения сдвига и вязкость водопроводной воды при фиксированных скоростях сдвига — 50, 150 и 300 с^{-1} . Из приведенных рисунков видно, что вязкость неактивированной воды ($t = 0$) мало зависит от скорости сдвига, в то время как напряжение сдвига изменяется достаточно существенно. После радиоволнового воздействия распределения функции $\tau(t)$ и $\eta(t)$ приобретают осциллирующий вид и становятся подобны ранее наблюдавшейся нами зависимости показателя активности ионов водорода pH от продолжительности воздействия радиоволнового поля [6]. При этом, наибольший эффект воздействия оказывает 5-минутная обработка, приводящая к наиболее существенному изменению зависимостей вязкости и напряжений сдвига от скорости деформации.

С учетом установленных особенностей ВЧМИО воды, в последующих реологических исследованиях цементного теста в качестве жидкости затворения была использована водопроводная вода, обработанная радиоволновым электромагнитным полем в течение 5 мин.

Известно, что цементное тесто, не содержащее химических добавок представляет собой вязкопластичную водно-дисперсную систему, состоящую из частиц клинкера и новообразований, размеры которых варьируются от коллоидных (10^{-7} – 10^{-8} м) до макроскопических (10^{-4} – 10^{-6}), реологические кривые которой можно описать, используя уравнения Шведова–Бингама [14]. Уже на начальной стадии гидратации цемента в тесте образуется сложная коллоидно-дисперсная структура, напряжение сдвига и вязкость которой зависит от градиента сдвиговой скорости (кривая 1 на рис. 6 и 7), т. е. тесто является неньютоновской жидкостью, характеризующейся высокой подвижностью после приложения определенного сдвигового напряжения — предела текучести τ_0 [14]. Реологические свойства таких систем определяются межчастичным взаимодействием дисперсной фазы, а

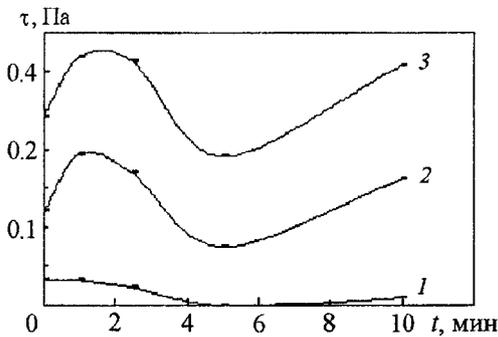


Рис. 4. Влияние продолжительности ВЧМИО на напряжения сдвига воды затворения при скоростях сдвига: 1 — 50 с^{-1} ; 2 — 150; 3 — 300

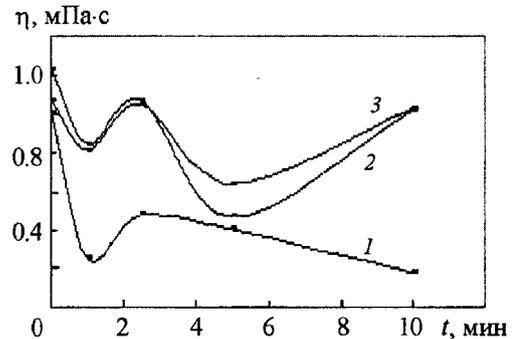


Рис. 5. Влияние продолжительности ВЧМИО на вязкость воды затворения при скоростях сдвига: 1 — 50 с^{-1} ; 2 — 150; 3 — 300

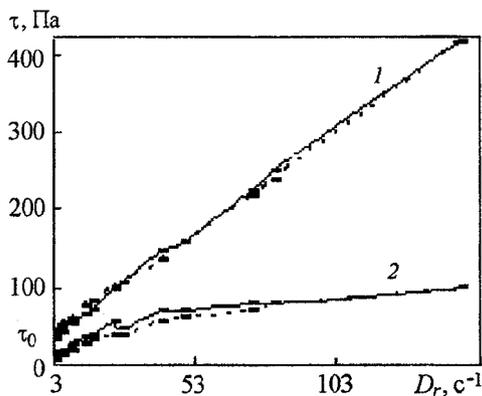


Рис. 6. Реограммы τ – D_r непластифицированного, в/ц — 0.35 (1) и содержащего 0.3% СП Стахемент-2000, в/ц — 0.25 (2) цементного теста

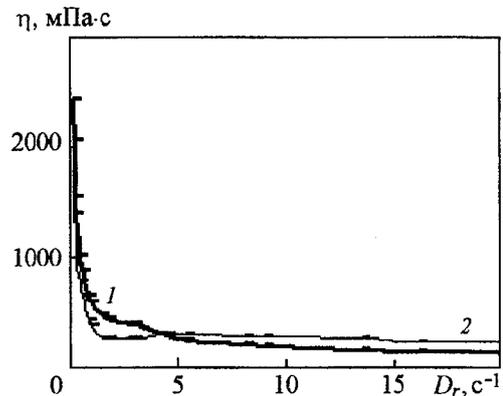


Рис. 7. Реограммы η – D_r непластифицированного, в/ц — 0.35 (1) и пластифицированного СП Стахемент-2000, в/ц — 0.25 цементного теста (2)

также свойствами дисперсионной среды — физически связанной, капиллярной и гравитационной (свободной) воды [15]. Увеличение ее содержания приводит к снижению вязкости теста.

Текучесть цементного теста в значительной степени определяется также толщиной пленок воды, формирующихся на поверхности частиц клинкера [14]. Введение в состав портландцементных систем суперпластификатора Стахемент-2000 М способствует образованию на поверхности клинкера водных защитных оболочек, формирующих электростатический, стерический и структурно-механический барьер, снижающий на участке до $D_r \approx 5 \text{ с}^{-1}$ вязкость теста (рис. 7, кривая 2), и позволяющий значительно уменьшить количество воды затворения без ухудшения подвижности и удобоукладываемости растворов и бетонных смесей.

Реограмма пластифицированного теста несколько отличается от реограммы теста, не содержащего добавок, и характеризуется тем, что, подобно ньютоновской жидкости, предел его текучности стремится к нулю (рис. 6, кривая 2). При этом, в отличие от классической ньютоновской жидкости, вязкость которой не зависит от направленности варьирования скорости сдвига (от малых значений к большим и наоборот), на регистрируемых нами реограммах пластифицированного цементного теста (рис. 6, кривые 1, 2) наблюдается петля гистерезиса, свидетельствующая о его тиксотропии и наличии периода релаксации напряжений и деформаций.

Добавка СП снижает скорость структурообразования теста. Как видно из рис. 6 и 7, реограммы пластифицированного теста характеризуются тремя участками (рис. 6, кривая 2). На начальной стадии (первый участок, для которого $D_r < 3 \text{ с}^{-1}$, а величина $\tau < \tau_0$) коагуляционная структура теста не разрушена, градиент скорости сдвига нулевой, а вязкость имеет максимальное значение (рис. 7, кривая 2). Для второго участка ($D_r > 3 \text{ с}^{-1}$) характерно превышение τ над τ_0 , выражающееся в переходе к линейной зависимости между скоростью деформации и напряжением сдвига (рис. 6, кривая 2), обусловленной выравниванием скоростей разрушения межчастичных контактов и образованием новых. При этом фиксируется резкое снижение вязкости (рис. 7, кривая 2), вызванное ориентацией частиц диффузного слоя в направлении сдвига. На третьем участке ($D_r > 53 \text{ с}^{-1}$) достигается предельное разрушение структуры и происходит близкое к ньютоновскому течение с постоянной для теста данного состава величиной вязкости (рис. 7, кривая 2).

По расположению реологических кривых цементного теста может быть оценена степень изменения его коагуляционных структур под воздействием внешних физических факторов [16]. В частности, ввиду близкого нахождения относительно друг друга реограмм 1–3 на рис. 8 для образцов, содержащих СП и неактивированную воду затворения, можно сделать вывод о том, что в интервале времени от 10 до 120 мин после затворения процессы коагуляционного структурообразования протекают достаточно медленно.

В случае использования активированной воды зарегистрированные через 10 мин после затворения теста реограммы имеют в области малых скоростей сдвига $\sim 30\text{--}50 \text{ с}^{-1}$ (рис. 9, кривая 1) четко выраженный экстремум (резкий рост структурно-механического показателя напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига, а затем такое же резкое ее падение). Данная особенность в распределении $\tau(D_r)$ на начальных ($t < 10$ мин) стадиях твердения теста была многократно подтверждена повторными экспериментами. На более поздних стадиях твер-

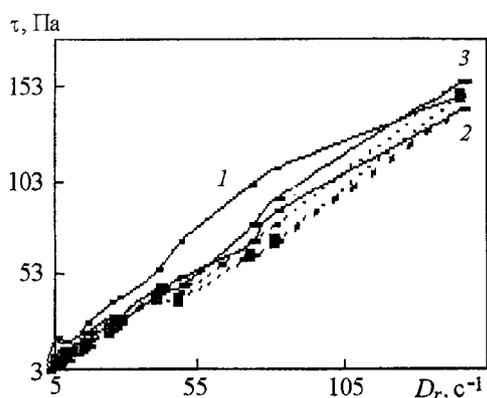


Рис. 8. Реограммы τ – D_r пластифицированного СП Стахемент-2000 цементного теста, в/ц — 0,25, содержащего неактивированную воду: 1 — 10 мин; 2 — 60; 3 — 120 после затворения. Сплошные линии — прямой ход; штриховые — обратный

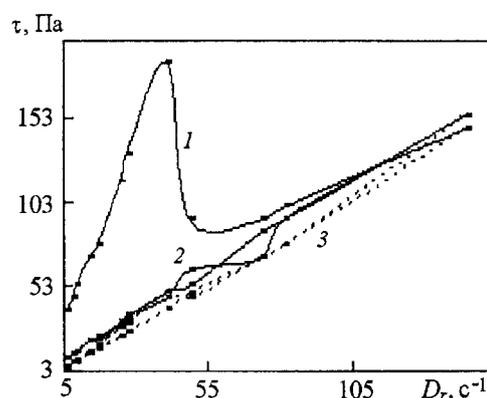


Рис. 9. Реограммы τ – D_r пластифицированного СП Стахемент-2000 цементного теста, в/ц — 0,25, содержащего активированную ВЧМЮ воду: 1 — 10 мин; 2 — 60; 3 — 120 после затворения. Сплошные линии — прямой ход; штриховые — обратный

дения ($10 < t \leq 120$ мин) происходила трансформация вида распределения $\tau(D_r)$ к практически линейной зависимости τ от D_r . Выявленный близкий к S-образному характер зависимости τ от D_r можно связать, как в работе [16], с образованием разрывов сплошности (зон скольжения), обусловленных особенностями формирования подобных структур. Но указанная аномалия может быть и следствием применения активированной ВЧМИО воды затворения, приводящего к интенсивному формированию частиц новообразований, их кластеризации, слипанию и усилению контактного трения в системе образующихся высококонцентрированных суспензий [17]. Установление истинной причины выявленного эффекта требует проведения дополнительных специальных экспериментов.

Для затворенных активированной водой образцов теста также характерен (в течение первых 60 мин) больший предел текучести, чем для немодифицированных составов (рис. 10, кривая 2).

Наблюдаемый эффект согласуется с результатами работы [18], в которой указывается, что процесс формирования коагуляционной структуры в портландцементном тесте, полученном на активированной постоянным магнитным полем воде затворения, может интенсифицироваться. Однако, в отличие от [18], при отверждении исследуемой нами системы, содержащей активированную ВЧМИО воду, наблюдается существенное снижение τ_0 (рис. 10, кривая 2) и уменьшение ширины гистерезисных петель, свидетельствующее об уменьшении тиксотропности теста (рис. 9, кривые 2, 3). При этом обратные реограммы теста с активированной водой имеют форму, присущую нелинейным вязкопластическим тиксотропным телам с неширокими петлями гистерезиса.

В реологическом отношении цементное тесто, по сравнению с цементно-песчаными или бетонными смесями, является наиболее изученной системой. Цементно-песчаные смеси могут быть рассмотрены, как двухфазные составы, представляющие собой распределенную в дисперсионной среде (цементном тесте) твердую фазу (песок). Их реологическое поведение также описывается "бингамовскими" уравнениями [14]. При этом необходимо учитывать как реологические характеристики теста, предотвращающего взаимный контакт частиц песка и обеспечивающего возможность пластических деформаций ЦПС, так и структурные характеристики (фракционный состав) заполнителя, обеспечивающего максимальную плотность материалов, а также содержание пленочной и капиллярной воды, иммобилизованной не только цементом, но и заполнителем [4, 20]. Принимая во внимание тот факт, что традиционные подходы, используемые для описания реологического поведения цементного теста, не всегда применимы для ЦПС [14, 15], а надежных теоретических моделей последних в настоящее время не существует [14, 15, 18], в строительной практике определение реологических характеристик ЦПС осуществляется с помощью стандартных конусов, позволяющих оценить совокупность их реологических параметров (удобоукладываемость, подвижность, жесткость) с отражением их эволюции во времени [13].

В работе [19] при использовании стандартного конуса нами было установлено, что величина подвижности ЦПС, содержащих активированную ВЧМИО воду затворения при оптимальном времени обработки $t = 5$ мин, увеличивалась, по сравнению с необработанными образцами, более, чем на 30%, а снижение t с 5 до 1 мин и его увеличение до 10 мин приводило к уменьшению данного параметра. Такой эффект, возникающий при применении активированной воды, не противоречит полученным в данной работе результатам (рис. 8–10), поскольку обнаруженные на начальной стадии кратковременные эффекты интенсификации твердения теста в ЦПС могут нивелироваться за счет присутствия заполнителя. Кроме того, оценка реологического поведения портландцементных систем, содержащих активированную высокочастотной магнитной обработкой воду, в каждом конкретном случае должна быть проведена при наличии достаточного количества статистических данных.

Заключение. В результате выполненных исследований установлено, что активация водопроводной воды сопровождается изменением ее реологического поведения — снижением напряжения сдвига τ и динамической вязкости η в исследуемом интервале D_r при экстремальной зависимости от времени обработки с максимумом при $t \approx 5$ мин. Показано, что на начальной стадии твердения (спустя 10 мин после затворения) реологическое поведение цементного теста, содержащего активированную воду, имеет аномальный характер, характеризующийся интенсивным формированием коагуляционной структуры. Отмечена последующая соизмеримость скорости

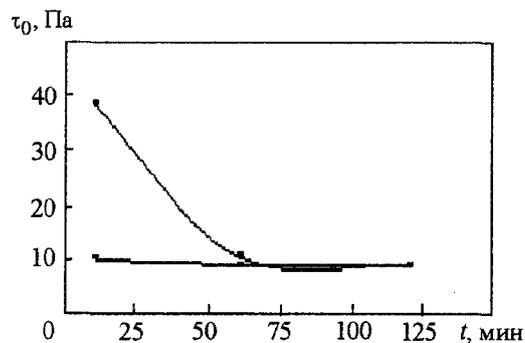


Рис. 10. Изменение предела текучести цементного теста, содержащего необработанную (1) и активированную (2) воду (в/ц — 0.25) в процессе твердения

структурообразования со скоростью формирования коагуляционных структур в тесте, содержащем необработанную воду затворения. Выявлено, что реологические параметры цементно-песчаных смесей с активированной водой, подвижность которых увеличивается по сравнению с контрольными смесями, может отличаться от структурно-механических параметров цементного теста более чем на 30%.

Обозначения

D_r — скорость сдвига, с^{-1} ; f — частота электромагнитного поля, МГц; H — напряженность магнитной составляющей поля, А/м; E — напряженность электрической составляющей поля, В/м; l — подвижность бетонных смесей, мм; t — время обработки, мин; η — динамическая вязкость, мПа·с; σ — коэффициент поверхностного натяжения, мН/м; τ — напряжение сдвига, Па.

Литература

1. Круглицкий Н. Н. *Очерки по физико-химической механике*. Киев: Наукова думка, 1988.
2. Гранковский И. Г. *Структурообразование в минеральных вяжущих системах*. Киев: Наукова думка, 1984.
3. Гранковский И. Г., Круглицкий Н. Н. О кинетике твердения минеральных вяжущих веществ. *Докл. АН СССР*. 1970. Т. 194, № 1. С. 147–148.
4. 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. С. 751–754.
5. 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.
6. 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. Т. 82, № 6. С. 1086–1092.
7. Фаликман В. Р., Вайнер А. Я., Башлыков Н. Ф. Новое поколение суперпластификаторов. *Бетон и железобетон*. 2000. № 59. С. 5–7.
8. Юхневский П. И. О механизме пластификации цементных композиций добавками. *Строительная наука и техника*. 2010. № 1–2. С. 64–69.
9. Несветаев Г. В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетоне. *Строительные материалы*. 2006. № 3. С. 25–31.
10. ГОСТ 2874–82. *Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством*. Москва: Изд-во стандартов, 1982.
11. ГОСТ 10178–85. *Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия*. Москва: Изд-во стандартов, 1985.
12. ГОСТ 310.3–76. *Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема*. Москва: Изд-во стандартов, 1976.
13. ГОСТ 10181.1.91. *Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости*. Москва: Изд-во стандартов, 1991.
14. Collepardi M. The Influence of Admixtures on Concrete Rheological Properties. *Cemento*. 1982. No. 4. Pp. 217–242.
15. Vombled J. V. Rheologie du beton frais. *Cim. Beton, Plâtres, Chaux*. 1978. No. 1. Pp. 27–29.
16. Тараканов В. М., Урьев Н. Б., Иванов Я. П. Структурообразование и реология неорганических дисперсных систем и материалов. *Материалы междунар. конф. по механике и технологии композиционных материалов*. София: Болгарская академия наук, 1988.
17. Башкирцева И. А., Зубарев А. Ю., Исакова Л. Ю. К реофизике высококонцентрированных суспензий. *Коллоид. журн.* 2009. Т. 71, № 4. С. 444–453.
18. Классен В. И. *Омагничивание водных систем*. Москва: Химия, 1982.
19. Белоус Н. Х., Кошевар В. Д., Родцевич С. П., Ажаронок В. В., Гончарик С. В. Влияние высокочастотной магнитно-импульсной обработки воды на технологические свойства пластифицированных портландцементных систем. *Vesці НАН Беларусі*. 2010. № 2. С. 110–114.
20. Блещик Н. П. *Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона*. Минск: Наука и техника, 1977.