

*Федосов С. В., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.,  
Акулова М. В., советник РААСН, д-р техн. наук, проф.,  
Слизнева Т. Е., канд. техн. наук, доц.,  
Ахмадулина Ю. С., аспирант  
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет  
Падохин В. А., д-р техн. наук, проф.,  
Базано А. В., канд. техн. наук, н. с.  
Институт химии растворов РАН*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ВОДНОГО РАСТВОРА ЖИДКОГО СТЕКЛА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

rector@igasu.ru

*Исследовано влияние механоактивации водного раствора натриевого жидкого стекла, используемого для затворения цементного теста, на физико-механические свойства цементных композитов. Показано, что механоактивация раствора способствует снижению водопоглощения цементного камня, а также положительно влияет на подвижность и сроки схватывания цементного теста. На основе статистической обработки опытных данных найдены рациональные значения технологических параметров процесса механоактивации и концентрации растворов жидкого стекла для улучшения эксплуатационных характеристик цементных композитов.*

**Ключевые слова:** цемент, жидкое стекло, механоактивация, метод планирования эксперимента.

В производстве жаростойких бетонов в качестве вяжущих применяются портландцемент, алюминатные цементы, жидкое стекло, фосфатные связующие [1]. В последние годы наметился переход к применению композиционных вяжущих, в состав которых входят дорогостоящие полимерные композиции, химический состав которых зачастую является коммерческой тайной. В то же время совместное использование портландцемента и жидкого стекла в качестве вяжущего не потеряло своей актуальности в связи со сравнительно невысокой стоимостью данных материалов. Улучшение эксплуатационных свойств бетонов на таком вяжущем может быть достигнуто за счет модификации технологии производства. Одним из направлений совершенствования технологического процесса производства бетона с целью улучшения его физико-механических свойств без значительного удорожания является активация составляющих бетонной смеси, в частности, воды затворения [2].

Известно, что высокоскоростное перемешивание воды сопровождается кавитацией, обусловленной перепадами давления внутри пузырьков газа [3]. Кавитация порождает целый комплекс физических, физико-химических эффектов и явлений. Среди них можно выделить нестационарные периодические повышения температуры и давления парогазовой смеси в кавитационных пузырьках; возникновение ударных волн и кумулятивных струй (истекающих при «схлопывании» пузырьков); генерирование электрических микрозарядов в пузырьках; возникновение сонолюминисценции; возбуждение и ионизацию молекул воды; образова-

ние радикалов, дегазацию воды и др. В результате этих процессов изменяются структура и свойства водных растворных систем затворения.

Ранее было установлено, что использование активированной воды для затворения цементного теста способствует более полной гидратации клинкерных составляющих портландцемента [4].

В данной работе проводились исследования влияния концентрации и времени механоактивации раствора жидкого стекла, входящего в состав композиционного вяжущего наряду с портландцементом, на подвижность и сроки схватывания цементного теста, затворяемого при различных водоцементных отношениях, а также на водопоглощение цементного камня.

В качестве исходных материалов использовались портландцемент М500 ДО (ГОСТ 30515-97 «Техническое описание. Область применения»), дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72\* «Вода дистиллированная. Технические условия»), жидкое стекло (ГОСТ 13078-81 «Стекло натриево-жидкое. Технические условия»).

Для проведения механоактивации использовали ударно-вихревой аппарат оригинального конструктивного оформления, ротор которого вращался с постоянной скоростью 3000 об/мин. Время активации можно было регулировать.

Сроки начала и окончания схватывания определяли по ГОСТ 310.3-76 (1992), подвижность - согласно ГОСТ 5802-86 и в соответствии с ГОСТ 10181-2001, водопоглощение - по ГОСТ 12730.3-78 (1994).

Работа проводилась в два этапа. На первом этапе исследовали влияние механоактивации

растворов жидкого стекла на дистиллированной воде при температуре 20 °С на их водородный показатель и удельную электропроводность. Результаты исследований, представленные в табл. 1, показали, что 10 %-ный раствор силиката натрия имел значительно более высокую электропроводность по сравнению с растворами меньшей концентрации, а также значительное –

в среднем на 42 % – повышение рН раствора до 11,2. В то же время, 0,1 %-ный раствор силиката натрия вызывает повышение рН в среднем на 33% по сравнению с водой, не содержащей  $Na_2SiO_3$ , при этом электропроводность изменялась незначительно.

Таблица 1

### Влияние времени активации и концентрации силиката натрия на водородный показатель и удельную электропроводность воды

Время обработки, сек.	Без добавления силиката натрия		10%-ный раствор силиката натрия		0,1%-ный раствор силиката натрия	
	рН	Удельная электропроводность, мСм/см	рН	Удельная электропроводность, мСм/см	рН	Удельная электропроводность, мСм/см
0	5,63	0,0047	10,5	8,23	9,76	0,0114
30	6,41	0,016	11,192	8,44	9,55	0,0154
60	6,60	0,0237	11,198	8,5	9,395	0,017
90	6,8	0,0311	11,208	8,57	9,309	0,0181

На следующем этапе изучали влияние активации растворов жидкого стекла, используемых в качестве воды затворения, на свойства цементных композитов. Для анализа зависимости водопоглощения, подвижности и сроков схватывания от водоцементного отношения,

времени активации и концентрации жидкого стекла применили метод планирования эксперимента. Все опыты проводили в соответствии с трехуровневым планом второго порядка Бокса-Бенкена [5]. Границы изменения факторов и их обозначения представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Интервалы варьирования факторов

	Факторы		
	Водоцементное отношение (В/Ц) (vc)	Время активации (t), сек	Концентрация силиката натрия (C), %
Обозначение в уравнениях регрессии	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Минимальное значение	0,28	30	0,1
Максимальное значение	0,35	90	10

Уравнения регрессии для выбранных откликов имели вид:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1, i < l}^n a_{il} x_i x_l + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_{ii}^2 \quad (1)$$

где  $y$  – отклик,  $a_0$ ,  $a_{il}$ ,  $a_{ii}$  – коэффициенты уравнения регрессии,  $x_i$  – нормированные факторы:

1) для водопоглощения

$$y_{ВП} = 9,972 + 0,8425x_1 - 0,185x_2 + 0,7625x_3 + 0,449x_1^2 - 1,0618x_3^2 + 0,845x_1x_3 + 0,285x_2x_3 \quad (2)$$

2) для подвижности

$$y_{П} = 9,4 + 13x_1 + 5,625x_2 - 0,875x_3 + 9,675x_1^2 + 4,425x_2^2 + 4,925x_3^2 \quad (3)$$

3) для сроков начала схватывания

$$y_{НС} = 82 + 29,375x_1 - 100x_3 + 52,75x_1^2 + 42,75x_2^2 + 31,5x_3^2 + 16,25x_1x_3 + 23,75x_2x_3 \quad (4)$$

4) для сроков окончания схватывания

$$y_{КС} = 191 + 31,25x_1 - 101,875x_3 + 18,25x_1^2 + 39,5x_2^2 + 16,25x_1x_3 + 52,5x_2x_3 \quad (5)$$

$$x_1 = \frac{vc - vc_0}{vc_{\max} - vc_0}, \quad x_2 = \frac{t - t_0}{t_{\max} - t_0} \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{c - c_0}{c_{\max} - c_0};$$

$vc_0$ ,  $t_0$ ,  $C_0$  – центр эксперимента;  $n$  – число факторов.

В результате обработки опытных данных методом планирования эксперимента были получены адекватные уравнения регрессии для следующих откликов:

На основе полученных уравнений были построены поверхности для каждого отклика в зависимости от двух факторов, третий фактор был зафиксирован на одном из уровней. На рис. 1 представлена поверхность для функции, описывающей водопоглощение.

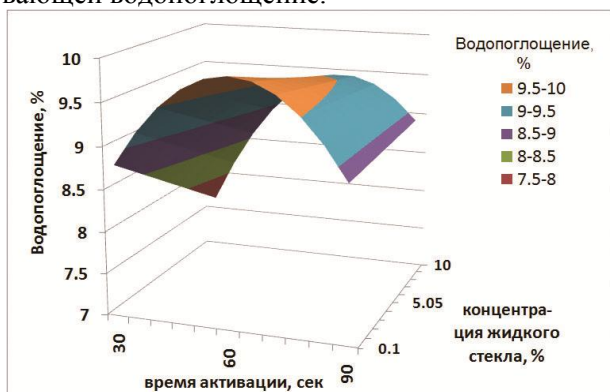


Рис.1. Зависимость водопоглощения цементного камня от времени активации и концентрации жидкого стекла (ж. с.) при В/Ц=0,29

Из анализа поверхности, представленной на рис. 1, следует, что для уменьшения водопоглощения необходимо проводить активацию в течение 30-50 секунд.

На следующем этапе сравнивали рассматриваемые характеристики цементных композитов, затворенных на растворе силиката натрия, предварительно активированном в течение 45 секунд, и аналогичные характеристики образцов, затворенных на неактивированном растворе силиката натрия. Для контрольных образцов концентрации растворов жидкого стекла составляли 0,1 %, 5,05 %, 10 % при водоцементных отношениях 0,28, 0,315 и 0,35. Результаты сравнения представлены на рис. 2-5. По оси абсцисс – концентрация раствора силиката натрия.

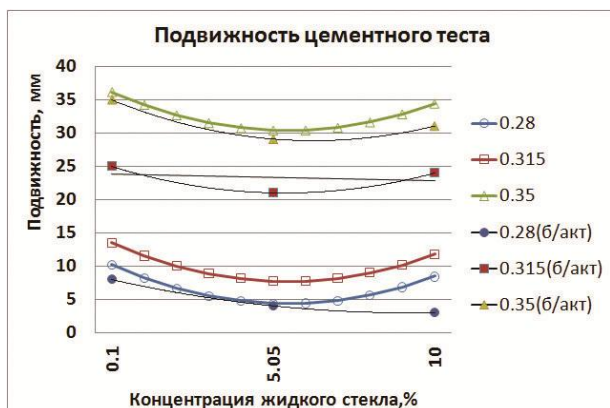


Рис.2. Зависимость подвижности цементного теста от концентрации жидкого стекла при водоцементных отношениях: 0,28, 0,315 и 0,35 для образцов на механоактивированных растворах жидкого стекла; 0,28(б/акт), 0,315(б/акт) и 0,35(б/акт) для контрольных образцов

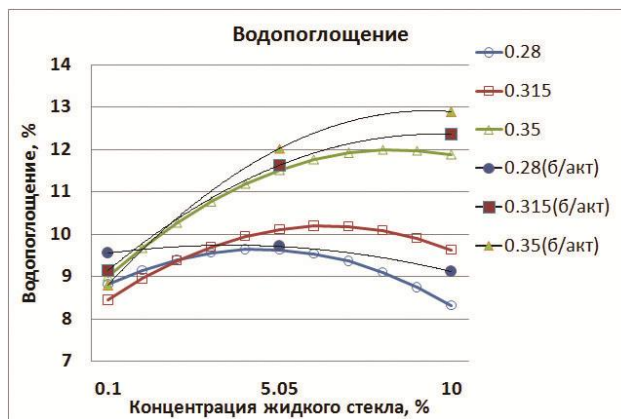


Рис.3. Зависимость водопоглощения цементного камня от концентрации жидкого стекла при водоцементных отношениях: 0,28, 0,315 и 0,35 для образцов на механоактивированных растворах жидкого стекла; 0,28(б/акт), 0,315(б/акт) и 0,35(б/акт) для контрольных образцов

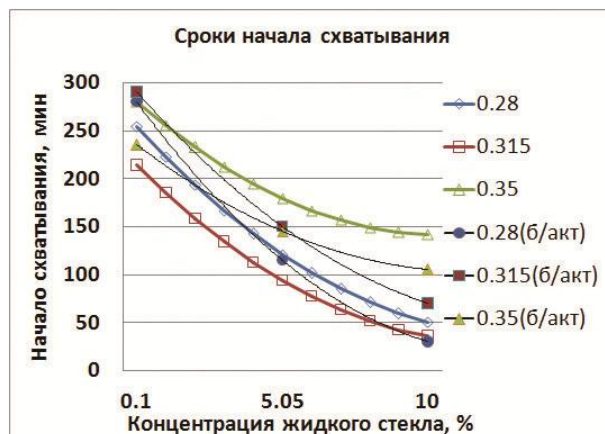


Рис. 4. Зависимость сроков начала схватывания цементного теста от концентрации жидкого стекла при водоцементных отношениях: 0,28, 0,315 и 0,35 для образцов на механоактивированных растворах жидкого стекла; 0,28(б/акт), 0,315(б/акт) и 0,35(б/акт) для контрольных образцов

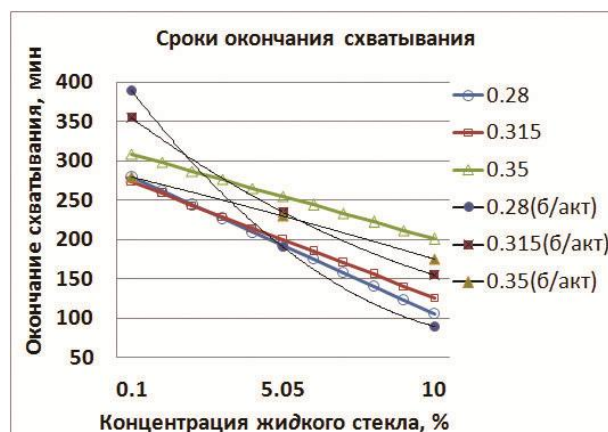


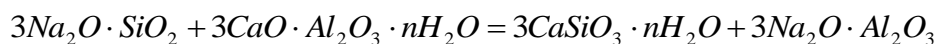
Рис. 5. Зависимость сроков окончания схватывания цементного теста от концентрации жидкого стекла при водоцементных отношениях: 0,28, 0,315 и 0,35 для образцов на механоактивированных растворах жидкого стекла; 0,28(б/акт), 0,315(б/акт) и 0,35(б/акт) для контрольных образцов

По рис. 2 видно, что контрольные составы показывали меньшую подвижность в тех случаях, когда водоцементное отношение составляло 0,28 или 0,35. При В/Ц=0,315 подвижность контрольных образцов была выше. Представленные на рис. 3 кривые водопоглощения контрольных образцов лежат выше соответствующих расчетных кривых, что указывает на более плотную структуру цементных композитов, затворенных на активированном растворе силиката натрия. Согласно графикам, приведенным на рис. 4, наибольший эффект ускорения схватывания наблюдался у цементного теста, затворенного на активированном растворе при водоцементном отношении 0,315, а наименьший – у цементного теста, затворенного на активированном растворе при водоцементном отношении 0,35. Кривые, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что сроки окончания схватывания умень-

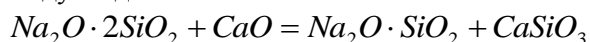
шаются по сравнению с контрольными составами после активации раствора силиката натрия концентраций ниже 5 %. При водоцементном отношении 0,28 схватывание начинается позже, чем при В/Ц=0,315, а заканчивается раньше.

Таким образом, можно утверждать, что наиболее рациональными значениями технологических параметров проведения процесса механоактивации являются следующие: водоцементное отношение 0,28-0,30; концентрация силиката натрия 2-4 %; время активации 40-45 секунд.

Сокращение сроков схватывания при использовании композиционного вяжущего обусловлено тем, что в результате химической реакции между жидким стеклом и гидроалюминатом кальция, входящим в состав цементного клинкера, образуются гидросиликат кальция и алюминат натрия согласно уравнению [1]:



Образующийся в составе цементного камня алюминат натрия является очень сильным ускорителем его схватывания. Кроме реакции, описанной выше, происходит еще одна реакция между жидким стеклом и известью:



Образовавшийся силикат кальция является очень прочным и плотным материалом. Отлагаясь в порах твердеющего камня, силикат кальция снижает проницаемость порового пространства и придает цементному камню повышенную плотность и водонепроницаемость [1].

Применение механоактивации раствора жидкого стекла, используемого для затворения портландцемента, позволило увеличить подвижность цементного теста с пониженным содержанием воды (В/Ц=0,28); получить более плотный цементный камень (уменьшение водопоглощения свидетельствует об образовании более мелких пор при твердении); несколько увеличить сроки схватывания при больших концентрациях добавки, а также сократить время между началом и окончанием схватывания. Механоактивация раствора силиката натрия способствует улучшению эксплуатационных характеристик цементных композитов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корнеев, В.И. Растворимое и жидкое стекло / В.И. Корнеев, В.В. Данилов – Санкт-Петербург: Стройиздат. – 1996. – 216 с.
2. Федосов, С.В. Применение нанотехнологий с использованием импульсной механоактивации комплексов жидких композитов в производстве бетонов / С.В. Федосов, М.В. Акулова, В.А. Падохин // Сб. докл. участников круглого стола «Наносистемы в строительстве и производстве строительных материалов» – М.: МГСУ, 2007. – 135 с.
3. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
4. Федосов, С.В. Анализ структуры и фазовых превращений в мелкозернистом бетоне на механомагнитоактивированной воде затворения с добавкой ПВА / С.В. Федосов, М.В. Акулова, Т.Е. Слизнева, В.А. Падохин // Сб: Актуальные проблемы бетона и железобетона. Материалы и конструкции, расчет и проектирование: Материал науч.-практич. конф. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т. – 2010. –С. 72-77.
5. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов – М.: Энергия, 1975–184 с.