

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИХ  
АКТИВИРОВАННЫХ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ  
ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ИНЪЕЦИРОВАНИИ  
КАНАЛОВ И ОМОНОЛИЧИВАНИИ СТЫКОВ И УЗЛОВ  
СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Глуценко В.М.** *к.т.н., проф.*

*Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская  
государственная академия строительства и архитектуры»*

Сборные железобетонные конструкции широко применяются в строительстве мостов, тоннелей, гидроэлектростанций и т.п. При этом особое внимание уделяется вопросам омоноличивания узлов и стыков железобетонных элементов. Связано это с необходимостью придавать таким элементам прочность и водонепроницаемость, не уступающие общей прочности и жесткости конструкции в целом.

Учитывая условия монтажа и сжатые сроки строительства, омоноличивание узлов и стыков должно осуществляться посредством быстро твердеющих бетонов и растворов. В связи с этим предусматривается использование для широких полостей (как правило, внешних) стыков шприц-бетона, а для узких (внутренних) полостей – активированных цементных растворов. Отличительной особенностью стыков, соединяющих вертикальные как полые, так и полнотелые балки сооружений, является наличие больших контактных поверхностей площадью 3-8 м<sup>2</sup> при малой ширине полости стыков от 2 до 8 см.

Заполнение таких стыков осуществляется напорной инъекцией (через различной конфигурации трубки) специальных растворов, обладающих высокой подвижностью, однородностью, нераслаиваемостью и хорошей адгезией к бетону основной конструкции. Высокая адгезия обеспечивается не только путем применения быстро твердеющих растворов, но также и тем, что эти составы обладают малыми усадочными деформациями.

Рядовые цементно-песчаные растворы при высоких В/Ц, обеспечивающих перекачивание, не обладают устойчивостью против расслаивания, быстро утрачивают однородность, поэтому малопригодны для инъектирования, а при известных расстояниях перекачки вообще не могут применяться для целей омоноличивания стыков и каналов железобетонных крупноразмерных конструкций.

Проведенные опыты показали, что наибольшей устойчивостью против расслоения и вместе с тем допустимыми усадочными деформациями обладают активированные цементно-песчаные растворы, приготовливаемые на измельченном песке. Было также установлено, что для достижения изложенных целей достаточно в раствор вводить лишь часть измельченного песка, оставляя остальную часть немолотой.

В связи с изложенным для омоноличивания стыков и инъецирования каналов сборных железобетонных конструкций целесообразно применять цементно-песчаные инъекционные растворы, приготовленные на активированном в акустическом поле цемента и измельченном (полностью или частично) песке.

Активация вяжущих свойств цемента при помощи акустической энергии возможна только в двухфазной среде, каковой является цементное тесто (цементно-песчаная суспензия). Поэтому активизатор должен выполнять две функции: смешивать цемент с водой до получения однородной массы и возбуждать акустические колебания во всем объеме цементного теста (цементно-песчаного теста), под влиянием которых в нем возникают явления кавитации.

Конструкция активизатора выбрана на основании обширных экспериментальных исследований.

Производственный активизатор цемента – установка циклического действия (рис. 1,а), в которой перемешивание цемента, измельченного песка и воды производится отдельно. Благодаря этому удалось устранить существующий недостаток совмещенных активизаторов, т.е. исключить унос частиц цемента отработанных воздухом.

Активизатор состоит из корпуса тестомешалки 1, внутри которой располагается приводной вал 3 с лопастями стреловидной формы, вогнутыми по спирали. По периметру лопастей укреплены стальные щетки для лучшего опорожнения корпуса тестомешалки. Вращение вала передается от электродвигателя 2 через редуктор и клиноременную передачу.

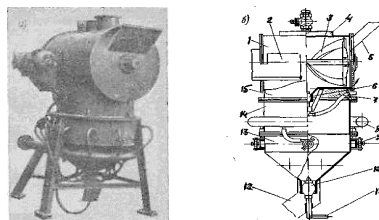


Рис. 1. Активизатор АЦ-6 циклического действия  
а) – общий вид; б) – принципиальная схема

Направление вращения вала выбирают таким, чтобы лопасти мешалки передвигали материал к центру. Это позволяет исключить недостаток, присущий лопастным смесителям, серийно выпускаемым нашей промышленностью, - затруднительный процесс выгрузки. К верхней части корпуса тестомешалки крепится течка 5, предназначенная для подачи отдозированной порции цемента и молотого песка. Вдоль цилиндрического корпуса тестомешалки (растворомешалки) расположен распределитель воды 4 с пробковым трехходовым краном и трубопроводом, а в нижней части корпуса монтируется сливной пневмоклапан 6. клапаном управляют при помощи сжатого воздуха. Корпус активизатора 14 крепится к тестомешалке снизу при помощи фланцев и переходной обечайки 15.

В переходной обечайке установлены воздухоочистные фильтры 7. в нижней части корпуса активизатора посредством фланцев и болтов присоединяется его конусное днище 13, в которое в определенном порядке вмонтированы аэрогидродинамические излучатели 9, расположенные по барботажно-камерной схеме. Воздух к излучателям от распределителя 8 подводят по шлангам. В нижней части конусного днища смонтирован одинаковый с верхним пневмоклапан 10 с подводящим воздухопроводом 11. Пневмоклапан сливным отверстием выходит в тесто отводящую течку 12, которая герметично крепится к конусному днищу активизатора.

В этом активизаторе впервые применили новую конструкцию запирающего устройства – пневмоклапан – предназначенного для работы в абразивных средах; в нем нет трущихся и подвижных частей, а управлять им можно дистанционно при помощи пневмоэлектрического распределителя (рис. 2).

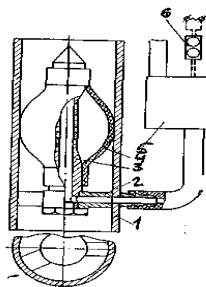


Рис. 2. Пневматический клапан

Пневмоклапан – цилиндрический корпус 1, внутри которого при помощи кронштейна 2 установлен ниппель 3 с надетой на него резиновой грушей. 4. Сжатый воздух к ниппелю поступает по трубопроводу от пневмоэлектрического распределителя 5. Управляют распределителем

лем при помощи кнопочной станции 6. Пневмоклапан надежен в работе, прост в изготовлении и может быть рассчитан на любое избыточное давление. В качестве груши можно использовать кусок трубки из вакуумной или другой эластичной резины.

Исследования эффективности акустической технологии приготовления инъекционных растворов проводили на подобноописанному лабораторных и полупроизводственных активизаторах.

Исследования показали, что акустическая активация цемента (цементно-песчаной смеси) аэрогидродинамическими излучателями повышает дисперсность и степень гидратации цемента, что подтверждается скоростью расслоения суспензии и увеличением осадка (рис. 3).

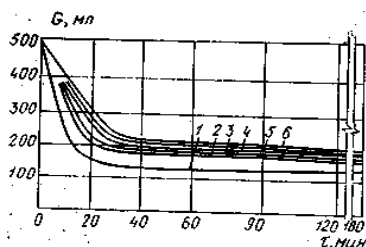


Рис. 3. Кривые скорости оседания (во времени) твердой фазы цементного теста ( $V/C = 0,55$ ): 1 – неактивированного; 2,3,4,5,6 – активированного в течение, соответственно, 5,10,20,45 и 60 мин.

Известно, что водоудерживающая способность цемента зависит, при прочих равных условиях, от его удельной поверхности. Поскольку акустическая активация цемента способствует увеличению его дисперсности, то адсорбционная способность цемента должна также повысится. О водоудерживающей способности цементного теста можно судить по объему отделившейся воды или выпавшего твердого осадка при определенной продолжительности седиментационного процесса.

Опыты показали (рис. 4), что при обработке цементного теста в акустическом поле, вследствие воздействия кавитационных процессов, происходит дезагрегация слипшихся зерен цемента, диспергирование более крупных частиц, их сольватация, что способствует получению более устойчивой гомогенной смеси.

Вследствие перераспределения влаги увеличивается количество адсорбционно связанной воды и создаются условия для проявления дополнительной контракции объема цементного теста. В результате повышается водоудерживающая способность цементного теста, его гомогенизация.

В цементном тесте (цементно-песчаном растворе) при наложении акустических колебаний в результате дефлокуляции слипшихся частиц и диспергированию цементных зерен происходит процесс перераспределения воды, растет концентрация ионов минералов цемента. Одновременно повышается коэффициент нормальной густоты системы и ускоряется процесс структурообразования, т.е. сокращается начало и конец схватывания цементного теста.

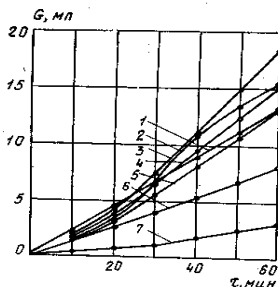


Рис. 4. Кинетика водоудерживающей способности цементного теста с В/Ц = 0,45: 1 – неактивированного; 2,3,4,5,6,7 – активированного, соответственно, 1,5; 2,5; 5; 10; 30 и 60 мин.

Акустическая активация цемента оказывает определенное влияние на кинетику структурообразования. Установлено, что пластическая прочность (рис.5) цементного теста  $R_{m(кр)}$  на активированном цементе обычно выше, чем прочность контрольного, однако на цементе, выпускаемом Криворожским цементным заводом,  $R_{m(кр)}$  активированного цемента оказалась ниже других заводов, что можно объяснить несколько увеличенным содержанием  $C_3A$ , так как его механическая прочность наименьшая, а гидратация протекает быстрее, чем  $C_4AF$ ,  $C_3S$  и  $C_2S$ . По этому в единице объема активированного цементного теста концентрация  $C_3A$  и  $Ca(OH)_2$  будет выше, чем в контрольном, что и объясняет выше изложенное. Кроме того, результаты рентгеноструктурного анализа подтвердили изменение фазового состава цементного камня, изготовленного из активированного цементного теста.

Для глубокого изучения данного вопроса определяли удельную поверхность и гранулометрический состав до и после активации (табл.1, табл.2).

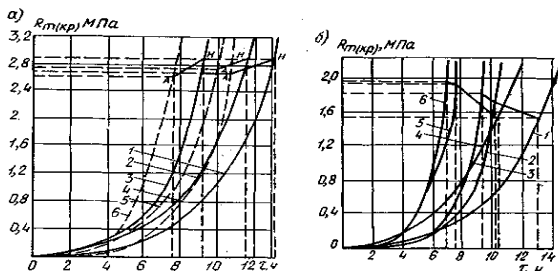


Рис. 5. Изменение пластической прочности цементного теста во времени  
 а) -1,2,3 – цементное тесто с В/Ц = 0,55 (1 – не активированное, 2,3 – активированное, соответственно, 15 и 25 мин); 4,5,6 – с В/Ц = 0,45 (4 – не активированное; 5,6 – активированное, соответственно 15 и 25 мин); б – 1,2,3 – не активированное цементное тесто с В/Ц, равным, соответственно, 0,55; 0,45; 0,33; 4,5,6 – активированное с В/Ц, равным, соответственно, 0,55; 0,45; 0,33.

Таблица 1

Изменения дисперсности «свежего» цемента в зависимости от водоцементного отношения и продолжительности активации

В/Ц	Время активации, мин	Остаток, %, на ситах, отв/м <sup>2</sup>		Удельная поверхность цемента, м <sup>2</sup> /кг, прошедшего через сито, отв/м <sup>2</sup>	
		4800 · 10 <sup>4</sup>	10000 · 10 <sup>4</sup>	4800 · 10 <sup>4</sup>	10000 · 10 <sup>4</sup>
0,45	0	16,1	18,9	372	495
	5	14,8	11,0	395	515
	10	13,4	9,6	401	482
	20	13,0	9,1	392	491
	45	12,1	8,3	410	529
	60	12,0	8,1	428	513
0,75	0	16	17,2	1384	481
	5	14,2	8,0	408	512
	10	13,4	6,5	398	518
	20	13,0	6,1	412	492
	45	12,4	5,7	421	540
	60	12,1	5,5	438	501

Активированное и контрольное цементное тесто промывали техническим спиртом не менее 5 раз. Затем фильтровали (абсолютным спиртом) с помощью вакуум-насоса. Разминали резиновым пестиком в резиновый колбе до разрушения комков. При обработке цементного те-

ста с В/Ц = 1,65 Кн.г остаток на ситах (4800-10000) · 10<sup>4</sup>отв/м<sup>2</sup> уменьшается. И тем значительнее, чем больше В/Ц. При этом удельная поверхность в результате активации возрастает на 50-70м<sup>2</sup>/кг (табл.1). Влияние акустической активации на дисперсность материала проявляется в большей мере при использовании лежалых цементов (табл.2). После шестимесячного хранения цемента удельная поверхность снизилась с 340 до 290 м<sup>2</sup>/кг, а прочность на сжатие с 37 до 30МПа.

Таблица 2

Изменение дисперсности лежалого (6мес.) цемента в зависимости от водоцементного отношения и продолжительности активации

Продолжительность активации, мин	Водоцементное отношение			
	1,6 Кн.г		1,9 Кн.г	
	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	R28, МПа	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	R28, МПа
0	290	30,0	302	26,9
5	351	57,8	356	44,8
10	378	56	388	53,4
20	361	59	401	57,2
45	364	57,4	374	52,2
60	384	59,2	380	50,1

Вместе с тем в результате активации удельная поверхность лежалого цемента возросла до первоначальной удельной поверхности исходного (свежего) цемента, а прочность цементного камня при этом повысилась в 1,5-2,5раза. Сравнивая изменения прочности с результатами седиментационного анализа констатируем, что с увеличением дисперсности цемента до некоторого значения плотность цементного камня возрастает, при этом наибольший эффект достигается после 3-5 минутной активации цементного теста. С увеличением продолжительности обработки более указанного срока возрастает количество полностью гидратированных частиц цемента, значительно снижающих плотность и прочность цементного камня.

В связи с изложенным для омоноличивания стыков сборных железобетонных конструкций (напр.. ГЭС и др.), инъецирование каналов крупноразмерных ЖБК целесообразно применять приготовленные в акустическом активизаторе цементно-песчаные суспензии, которые приобретают весьма ценные свойства – дисперсность, повышенную стабильность, способность к перекачиванию на значительные расстояния без существенного расслаивания.

Цементно-песчаный камень (раствор) получаемый из таких суспензий, характеризуется высокой прочностью, однородностью и водонепроницаемостью.

Для испытаний прочности стыка на срез и растяжения использовали образцы–кубы с контактной площадью 400см<sup>2</sup>. В центральной части одного из стыкуемых образцов имелось сквозное отверстие, куда закладывали иньектор с резиновым уплотнением, через который велась иньекция раствора. По контуру образца укладывали конопляный (пеньковый) жгут, который образовывал замкнутый контур с площадью 300см<sup>2</sup>.

По углам фиксировали заданную толщину шва. Струбцинами стягивали образцы. Избыточная вода (влага) из иньекционного раствора отжималась. Образцы, после окончания иньекции, выдерживали под давлением. Давление снимали, образцы, затянутые хомутами, ставили на хранение в нормальные условия. В таблице 3 приведены результаты испытания на срез цементно-песчаного (иньекционного) стыка. В таблице 4 приведены результаты испытания стыка на растяжение.

Кроме того, были проведены испытания на сдвиг, для чего изготовили 8 пар плит с площадью стыкования 3600 см<sup>2</sup> (четыре контрольные и 4-на активированном составе). Стык между плитами был иньектирован под давлением 0,5МПа цементно-песчаным раствором Ц: молотый песок = 1:0,3. с В/Ц = 1

Таблица 3

Время перемешивания раствора и обработки в акустическом поле, сек	Способ перемешивания	Исходное В/Ц	Давление иньекции, МПа	Прочность стыка на срез МПа, через	
				7 суток	28 суток
300	Простая лопастная мешалка со скоростью вращения ротора 60 об/мин	1	0,3	0,14	0,21
90	Акустический активизатор цемента	1	0,3	0,12	1,4,8

Образцы были испытаны на сдвиг в возрасте 28 суток и показали сопротивление сдвигу 1,2МПа для стыков, омоноличенных не активированным раствором, и 2,3 МПа для стыков омоноличенных активированным раствором. Следовательно, прочность на сдвиг возросла в 2,6 раза.



Таблица 4

Время перемешивания раствора и обработки в акустическом поле, сек	Способ перемешивания	Исходное В/Ц	Давление инъекции, МПа	Прочность стыка на растяжение, МПа, через	
				7 суток	28 суток
300	Простая лопастная мешалка со скоростью вращения ротора 60 об/мин	1	0,3	0,21	0,368
90	Акустический активизатор цемента	1	0,3	0,9	2,7

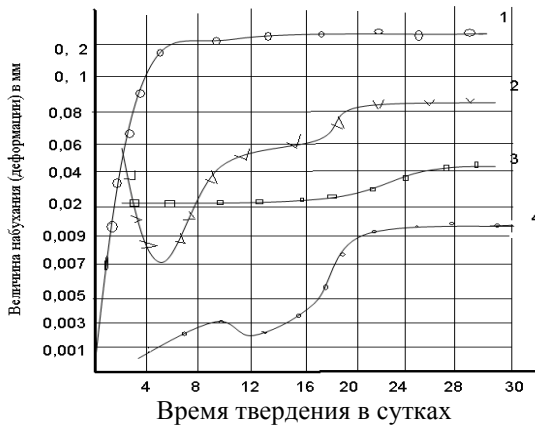


Рис. 6. Влияние акустической активации на деформативные свойства инъекционных составов: 1 - цементное тесто (Ц:В = 1:1) приготовленное в обычном смесителе (без песка); 2 - активированное цементное тесто (Ц:В = 1:1); 3 - цементно-песчаное тесто (Ц:П:В = 1:1:1); 4 - активированное цементно-песчаное тесто (Ц:П:В = 1:1:1)

Усадочные деформации исследовались специальными опытами согласно существующих стандартов. Сравнивали деформации усадки как обычного цементного камня с В/Ц = 1 без песка, так и с песком состава 1:1 (цемент:песок) с тем же В/Ц = 1. приготавливали и испытывали растворы не активированные и активированные в акустическом активизаторе в течение трех минут. Результаты измерений сопоставляли практически ежедневно в течение 28 суток. Данные рис. 6. показывают, что величина усадки активированных растворов как с песком

$3 \cdot 10^5$ , так и без песка  $7 \cdot 10^{-3}$  меньше соответствующий деформаций не активированных растворов.

### **Выводы**

Инъектирование каналов сборных железобетонных конструкций, а также омоноличивание их узлов и стыков целесообразно проводить с помощью активированных в акустическом поле цементно-песчаных растворов.

Аэрогидродинамические излучатели возбуждают в суспензии явление кавитации [1], что в итоге обуславливает:

1) значительное улучшение свойств цементно-песчаного раствора - повышение дисперсности, нерасслаиваемости, однородности, текучести, снижению вязкости, что способствует лучшему инъектированию каналов сборных железобетонных конструкций и лучшему заполнению стыков;

2) резкое повышение прочности раствора (в 3-5 раз и более), особенно в ранние сроки твердения;

3) увеличение прочности на сдвиг стыкуемых железобетонных элементов (в 1,5-3 раза);

4) уменьшение усадочных деформаций активированных составов по сравнению с растворами не активированных идентичных составов.

### **Summary**

**Acoustic technology of mortar mixes and compositions for monolithing of units and joints of precast reinforced concrete structures, injection of canals of cement stone in concretes and mortars, kinetics of structure formation is considered in the article.**

1. Ахвердов И.Н. Влияние фазовых превращений в процессе твердения цементного камня на его физико-механические и деформативные свойства // И.Н. Ахвердов // В кн.: Структура, прочность и деформативность бетонов. - М.: Стройиздат, 1965.

2. Ахвердов И.Н. Механизм окрашивания цементных зерен в акустическом поле / И.Н. Ахвердов, В.Г. Бобыль, В.М. Глушенко, Б.А. Плющ // Материалы Всесоюзной конференции по технологии цветных цементов и бетонов. – Днепропетровск: «Пламя», 1970.

3. Глушенко В.М. Исследование эффективности акустической активации цемента аэрогидродинамическими излучателями в технологии бетона / В.М. Глушенко // Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук.-Минск: БПИ, 1970.

4. Глушенко В.М. Акустическая технология бетонов / В.М. Глушенко // Вісник ПДАБА. – Днепропетровск: ПГАСА, № 2-3, 2010.