

УДК 666.97.035.51

## ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА

А.П. ШВЕДОВ

*Рассматриваются методы электроактивации цементных систем применительно к возведению конструкций из бетона в условиях строительной площадки. Предложен механизм проведения электроактивации, на основе которого выведена зависимость необходимого градиента напряжения от тонкости помола цемента. Показана возможность использования электроактивированных переменным электрическим током, изменяющимся в дискретном разрядно-импульсном режиме, цементных суспензий для снижения энергозатрат в процессе ухода за уложенным бетоном в построечных условиях.*

Важной проблемой возведения монолитных бетонных и железобетонных конструкций является ускорение набора прочности и сокращение энергозатрат. Этого можно достичь различными способами и средствами, в том числе и за счет введения химических модификаторов, с последующей обработкой цементных систем физическими воздействиями, к примеру, электрическим полем. В строительстве опробованы различные варианты воздействия электрическим полем на цементные системы для повышения их активности.

Одним из распространенных вариантов является обработка компонентов бетонной смеси высоковольтным электрическим разрядом напряжением до 10 кВ [1]. Обычно обрабатывается цементно-водная суспензия, которая затем используется как вода затворения, при этом прочность готовых изделий возрастает на 30 %.

Имеются варианты обработки приготовленной бетонной смеси в момент начала схватывания цемента электрическим импульсом длительностью  $10^{-6}$  с с напряженностью 18 кВ/м [2]. В этом случае прочность бетона повышается на те же 30 %. Аналогичные данные представлены в работе [3], однако в ней используется электрическое поле напряженностью 430 В/м, а момент обработки соответствует началу схватывания.

Повышение прочности готового бетона можно добиться, используя импульсное электрическое поле высокого напряжения в пределах 50 – 60 кВ [4]. При этом длительность обработки составляет 10 минут, а время приложения воздействия должно совпадать с периодом начала схватывания растворной смеси.

Несмотря на разные режимы, как по величине используемого напряжения, так и длительности временного интервала, конечный эффект практически совпадает, как совпадает и время приложения воздействия. Само понятие «схватывание» в большей степени характеризуется реологическими характеристиками цементного теста и только усредненно связано с внутренними физико-химическими превращениями. Поэтому даже в заводских условиях определить время начала обработки при формовке конструкций из нескольких порций бетонных смесей, затворенных в разное время, – задача трудноразрешимая. Тем более, весьма проблематично применение предлагаемых способов в технологии монолитного бетона.

Ускорению процессов гидратации способствует отвод продуктов реакции с поверхности цементных зерен. В процессе отвода продукты должны перемещаться в водной среде имеющей разную плотность [5]. Вода, имеющая разную плотность, по данным исследований имеет и другие различия. К примеру, диэлектрическая постоянная у воды [6] с плотностью  $2000 \text{ кг/м}^3$  равна 2 – 3.

Различия в диэлектрической проницаемости дают основания считать, что ее полярность при разной плотности так же различна. При разной полярности растворимость жидкостей друг в друге ограничена, поэтому на границе раздела фаз жидкостей с разной плотностью возникает пограничное или межфазное натяжение. Пограничное натяжение, в соответствии с правилом Антонова, равно разности поверхностных натяжений этих жидкостей (на границе с воздухом) в условиях взаимного насыщения. Достоверные данные для адсорбционной воды в указанном состоянии отсутствуют.

Для перехода частицы из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью необходимо преодолеть силу поверхностного натяжения. Такие перемещения требуют дополнительной энергии.

Как показывают расчеты [7], увеличить энергию продуктов гидратации можно при помощи электрического поля, изменяющегося в дискретном разрядно-импульсном режиме с максимальным мгновенным градиентом напряжения, равным

$$gradU = 1.372 \cdot 10^8 \cdot \left[ 1 - \frac{\left\{ -2 \cdot (0.395 - \kappa_{нз}) \cdot 10^{-6} \cdot \cos \left[ \frac{\arccos \left( -\frac{5 \cdot 10^{-2}}{(0.395 - \kappa_{нз})} \right) + \frac{\pi}{3}}{3} \right] \right\}^3}{\left\{ -2 \cdot (0.395 - \kappa_{нз}) \cdot 10^{-6} \cdot \cos \left[ \frac{\arccos \left( -\frac{5 \cdot 10^{-2}}{(0.395 - \kappa_{нз})} \right) + \frac{\pi}{3}}{3} \right] + \Delta S \right\}^3} \right]^4 \quad (1)$$

где  $\kappa_{нз}$  – коэффициент нормальной густоты цементного теста;

$\Delta S$  – расстояние перемещения иона, м.

Согласно (1), величина необходимого воздействия зависит только от коэффициента нормальной густоты цементного теста или приближенно от тонкости помола цемента.

При воздействии на цементную суспензию градиентом напряжения определенной величины ионы и отдельные частицы придут в движение и смогут перемещаться из мест диффузного слоя, имеющих большую плотность, в места с меньшей плотностью, тем самым удаляясь от границы раздела, т.е. цементной частицы. Как показывают расчеты, выполненные для разных расстояний перемещения с использованием (1), не требуется большого градиента напряжений, даже на перемещение частиц на расстояние в пределах  $4 \cdot 10^{-10}$  м.

С учетом толщины пленки связанной воды [5]  $6,5 \cdot 10^{-8} - 1,65 \cdot 10^{-7}$  м, величина разового перемещения на два порядка отличается от величины пути, преодолев который частица не будет связана с цементным зерном, а это означает реальность таких переходов.

Знаменатель правой части равенства (1) показывает взаимосвязь градиента напряжения с коэффициентом нормальной густоты цементного теста или с определенной степенью приближения и с тонкостью помола цемента. Для наглядности и упрощения расчетов заменим его коэффициентом  $K_{m,n}$ , который будет равен:

$$K_{m,n} = -2 \cdot (0.395 - \kappa_{нз}) \cdot 10^{-6} \cdot \cos \left[ \frac{\arccos \left( -\frac{5 \cdot 10^{-2}}{(0.395 - \kappa_{нз})} \right) + \frac{\pi}{3}}{3} \right] \quad (2)$$

С учетом (2) формула (1) имеет следующий вид

$$gradU = 1.372 \cdot 10^8 \cdot \left[ 1 - \frac{K_{m,n}^3}{(K_{m,n} + \Delta S)^3} \right]^4 \quad (3)$$

Электрическое поле с необходимым градиентом напряжения (3) приведет в движение ионы, которые во время столкновений будут передавать энергию продуктам гидратации. Увеличение энергии у частиц продуктов гидратации заставит их переходить на уровни с большей энергией. Но переход возможен только в том случае, если частица обладает достаточной энергией.

Необходимая для обработки мощность, как показывают расчеты, зависит от массы и теплоемкости воды и цемента, экзотермии цемента и температуры цементной суспензии. Экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о том, что величина градиента напряжения, используемая при обработке цементных суспензий на основе водного раствора суперпластификатора, имеет следующие значения: 90 – 100 В/м, 250 – 280 В/м и 670 – 690 В/м.

При проведении активации с большим градиентом напряжения суспензия должна охлаждаться, меньший градиент использовать не представлялось возможным из-за сложностей в работе оборудования.

Изучение влияния цементных суспензий активированных электрическим полем, изменяющимся в дискретном разрядно-импульсном режиме, проводилось с использованием специальной установки, собранной на основе тиристорного регулятора.

Для определения малознергоемких режимов электропрогрева бетона был спланирован и реализован трехфакторный эксперимент. Условия эксперимента и его результаты приведены в таблице.

Матрица планирования, средние значения энергозатрат и прочности бетона

№ опыта	Натуральные значения факторов			Прочность бетона, МПа				Энергозатраты, кВт·ч/м <sup>3</sup>
	скорость подъема температуры, °С/ч ( $X_1$ )	температура изотермы, °С ( $X_2$ )	длительность изотермы, ч ( $X_3$ )	при использовании суспензии		стандартные условия		
				через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	
1	20	90	6,5	29,12	33,6	24,96	28,48	98
2	20	50	6,5	25,6	39,36	22,72	32,96	51
3	5	90	6,5	33,6	40,32	27,52	32,64	117
4	5	50	6,5	30,08	43,52	23,68	36,16	56
5	20	70	10	29,44	38,08	24,96	28,48	85
6	20	70	3	24,96	39,36	19,2	31,04	62
7	5	70	10	33,6	41,28	27,84	32,96	96
8	5	70	3	28,8	42,24	23,04	37,12	74
9	12,5	90	10	32,96	36,16	27,52	28,48	119
10	12,5	90	3	31,04	38,4	23,68	31,36	91
11	12,5	50	10	29,76	39,68	24,0	34,88	69
12	12,5	50	3	25,28	41,6	17,6	36,16	51
13	12,5	70	6,5	30,72	41,92	24,96	31,36	69
14	12,5	70	6,5	30,4	41,28	23,04	32,64	69
15	12,5	70	6,5	31,04	40,96	24,0	31,04	69

До электропрогрева образцы выдерживались в течение двух часов при положительной температуре, а скорость остывания после электропрогрева поддерживалась 10 °С/ч. После обработки экспериментальных данных получены модели прочности бетона через 4 часа после электропрогрева и 28 суток в зависимости от режимов электропрогрева.

$$\bar{R}_e^a = 31 - 2,1 \cdot X_1 + 2 \cdot X_2 + 2 \cdot X_3 - 0,6 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,8 \cdot X_1^2 - 0,3 \cdot X_2^2 - 0,7 \cdot X_3^2; \quad (4)$$

$$\bar{R}_e^{a28} = 41 - 2 \cdot X_1 - 2 \cdot X_2 - 0,8 \cdot X_3 - 0,6 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1^2 - 1,7 \cdot X_2^2 - 0,7 \cdot X_3^2; \quad (5)$$

$$\bar{R}_e = 24 - 1,3 \cdot X_1 + 2 \cdot X_2 + 2,6 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,6 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,6 \cdot X_1^2 - 0,9 \cdot X_3^2; \quad (6)$$

$$\bar{R}_e^{28} = 32 - 2,2 \cdot X_1 - 2,4 \cdot X_2 - 1,4 \cdot X_3 + 0,4 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,6 \cdot X_2^2 + 0,4 \cdot X_3^2. \quad (7)$$

Анализ зависимостей (4) – (7), представленных моделями на рис. 1, 2, позволяет считать рациональными режимы электротермообработки активированного бетона, имеющие скорость подъема температуры 5 – 12 °С/ч, а температуру экзотермического прогрева 50 – 60 °С.

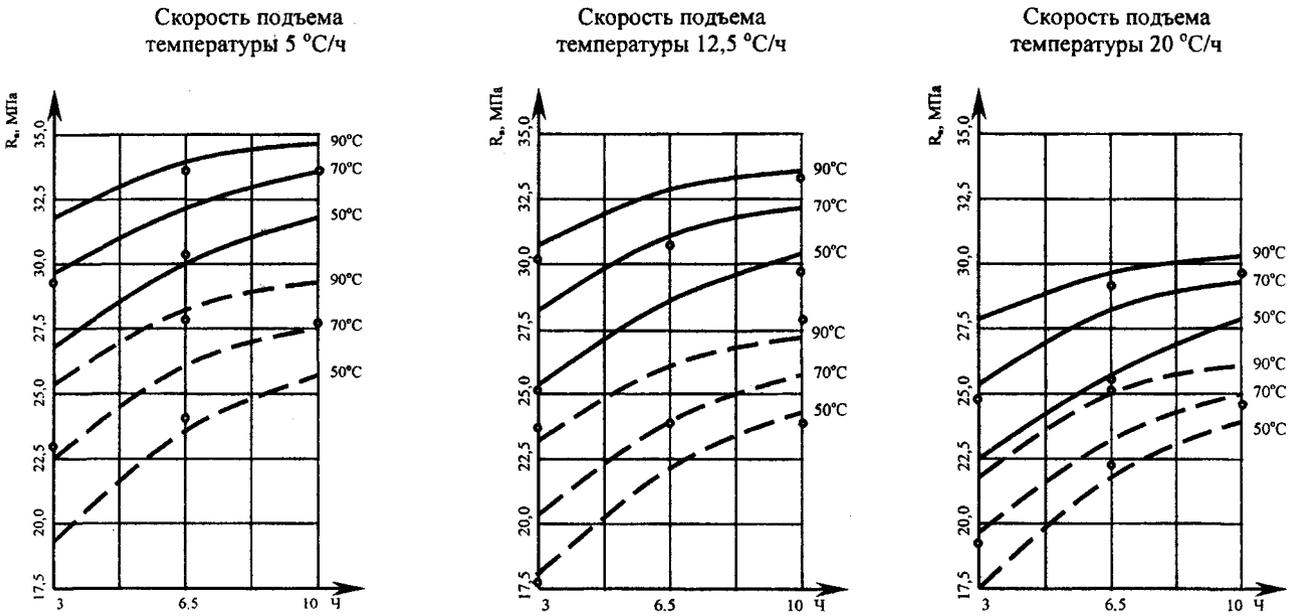


Рис. 1. Прочность бетона на сжатие через 4 часа после электропрогрева при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева в зависимости от длительности изотермического выдерживания:

————— при использовании активированной суспензии;  
 - - - - - контрольный состав

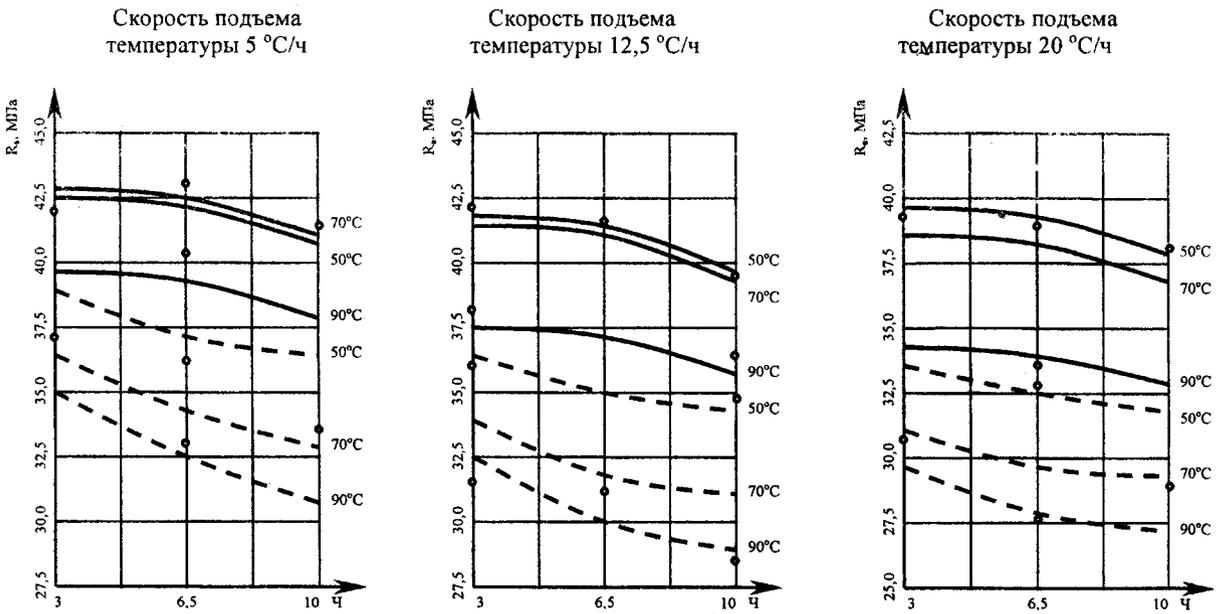
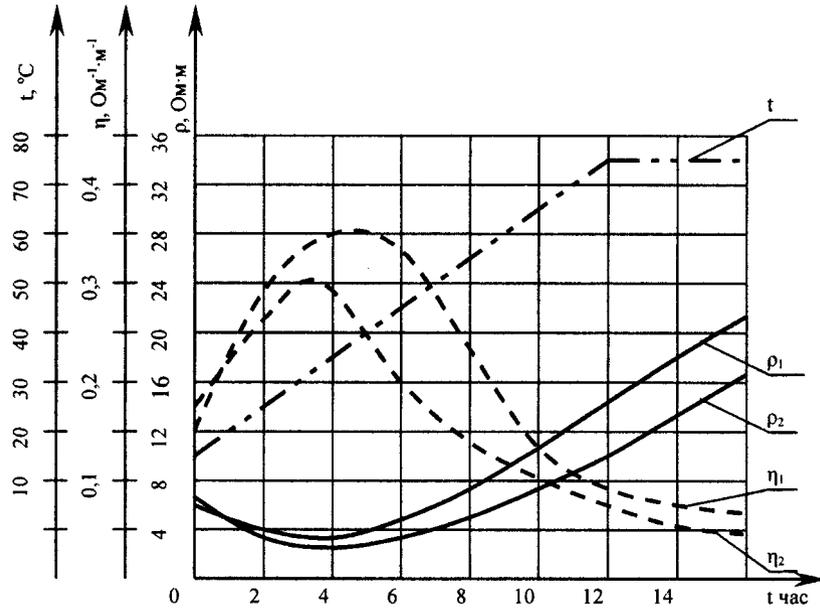


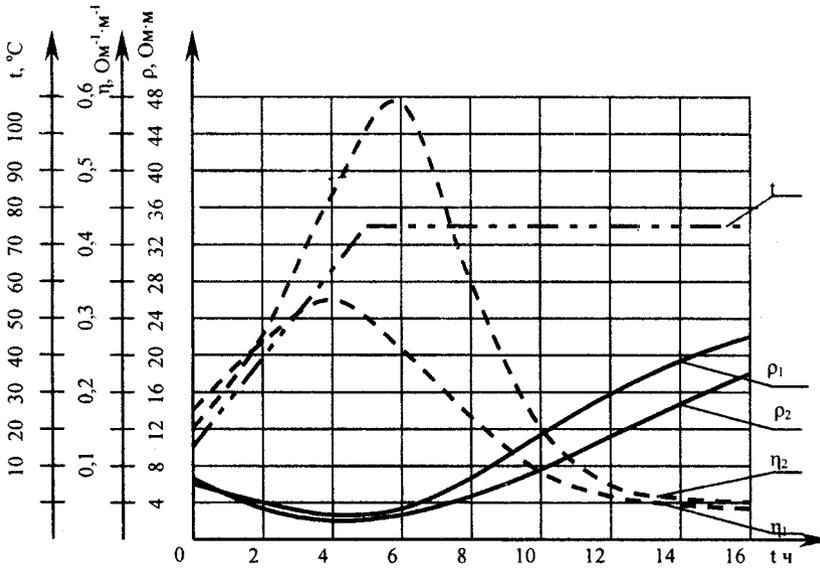
Рис. 2. Прочность бетона на сжатие через 28 суток после электропрогрева при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева в зависимости от длительности изотермического выдерживания:

————— при использовании активированной суспензии;  
 - - - - - контрольный состав

Так как при проектировании режимов электропрогрева в качестве исходной информации используется электросопротивление бетонной смеси, был изучен характер его изменения во времени. Результаты исследований представлены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Изменение электрофизических характеристик бетона в процессе электропрогрева:  
а – скорость подъема температуры 5 °С/ч; б – 12,5 °С/ч;

$\rho_1 - \eta_1$  – бетон без суспензии;  $\rho_2 - \eta_2$  – бетон с активированной суспензией

Как видно из рис. 3, изменение электросопротивления бетонной смеси в процессе электротермообработки и его величина позволяют вести процесс при пониженном напряжении, что позволит повысить уровень электробезопасности производственных работ по электропрогреву на строительной площадке.

Оптимальные режимы были проверены в производственных условиях. Проверка подтвердила возможность сокращения энергозатрат при электропрогреве на 15 – 42 % как и сроков выдерживания конструкции в опалубке на 30 – 35 %.

### Выводы

1. При применении для интенсификации твердения электропрогрева максимальная прочность бетона, приготовленного с использованием активированной цементной суспензии, достигается при мягких режимах проведения процесса, т.е. при небольшой скорости подъема температуры, равной 5 – 12 °С/ч.

2. С увеличением температуры изотермического прогрева свыше 50 °С прочность электроактивированного бетона в 28-суточном возрасте, как правило, снижается. Снижаются также и показатели экологии энергозатрат по сравнению с неактивированным бетоном.

3. Показатели изменения электросопротивления активированной бетонной смеси в процессе электротермообработки и ее величина позволяют вести процесс при пониженном напряжении, что повышает уровень безопасности производства работ по электропрогреву бетона на строительной площадке.

4. Использование активированной цементной суспензии позволяет при достижении заданных распалубочной и проектной прочностей бетона снизить затраты электроэнергии при термообработке бетона на 20 – 40 % и одновременно сократить сроки выдерживания бетона в опалубке на 30 – 35 % при сокращении продолжительности экзотермического прогрева на 56 – 87 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Файнер М.Ш. Энергосберегающие модификаторы цемента и бетонов // Энергосбережение в строительстве: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Киев – Черновцы, 1996. – С. 64 – 85.
2. Клименко В.М. Электрофизическая обработка бетонных смесей с химическими добавками: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10; 02.00.05 / Саратовский гос. техн. ун-т. – Саратов, 2002. – 17 с.
3. Ганин В.П. Интенсификация производства деталей крупнопанельных домов путем электрообработки. – М.: Центр НТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1971. – 48 с.
4. Данилова Ю.С. Активация цементных растворов при воздействии электрического поля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Самарская гос. архит. строит. академ. – Самара, 2002. – 19 с.
5. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 231 с.
6. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 465 с.
7. Интенсификация процесса твердения бетона за счёт разрядно-импульсной обработки цементных паст / Н.П. Блещик, В.В. Коньков, А.П. Шведов, И.П. Шведов // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона: Сб. научн. ст. междунар. конф. – Мн., 1997. – Т. 2. – С. 9 – 15.