

УДК 666.97.035.51

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ

*доктор техн. наук, профессор Н.П. БЛЕЩИК, А.П. ШВЕДОВ*

*Обоснована возможность использования интенсивных технологий, основанных на целенаправленном использовании энергии электрического поля, в технологии бетонных работ. Определены оптимальные параметры проведения электроактивации цементных суспензий переменным электрическим током, изменяющимся в дискретном разрядно-импульсном режиме. Изучены основные технологические свойства бетонных смесей (подвижность и жизнеспособность), приготовленных на основе электроактивированных цементных суспензий.*

В современной технологии бетонных работ наблюдается переход от привычных экстенсивных методов к интенсивным технологиям, обеспечивающим ускорение темпов работ с существенной экономией энергозатрат. Перспективным в этом направлении является внедрение электронно-ионных технологий, связанных с целенаправленным использованием энергии электрического поля. При внедрении интенсивных приёмов обработки компонентов бетонной смеси электрическим полем с различными комбинациями формы и напряжённости можно обеспечить оптимальные условия самоорганизации, распределения модифицирующих веществ и активации вяжущего.

Цементно-водная суспензия представляет собой электролит, поэтому перспективным является использование для этих целей энергии электрического поля. Для осуществления процесса необходимо найти его вид и параметры. Отвод продуктов реакции приведёт к насыщению жидкой фазы суспензии продуктами гидратации цемента и образованию на поверхности цементных частиц активных центров кристаллизации. Движение ионов под действием электрического тока приведёт к перераспределению концентрации продуктов гидратации в жидкой и твёрдой фазе и создаст возможность дополнительного образования активных центров кристаллизации в объёме.

Продукты гидратации удерживаются на поверхности цементных зёрен в основном за счёт кулоновских сил, поэтому для повышения эффективности отвода необходимо уменьшить заряд цементной частицы. Для этих целей можно использовать добавки – ускорители твердения, к примеру, сульфат натрия. Эффективность повысится также с увеличением числа зародышей, это можно сделать путём диспергирования цемента, т.е. применяя добавки диспергаторы или суперпластификаторы.

Прохождение электрического тока вызывает локальное повышение температуры в токопроводящем пространстве (здесь же идут и процессы структурообразования). Поэтому состав и структура таких центров кристаллизации должны в значительной мере соответствовать кристаллогидратам цемента, твердеющего при повышенных температурах, особенно в присутствии электрического тока, т.е. электропрогреве.

Изложенное позволяет предположить возможности использования водного раствора суперпластификатора и ускорителя твердения в качестве среды для проведения обработки цемента электрическим током с последующим использованием цементной суспензии в качестве воды затворения, для интенсификации твердения бетона и сокращения энергозатрат или повышения конечной прочности.

Изучение влияния цементных суспензий, активированных электрическим полем, изменяющимся в дискретном разрядно-импульсном режиме, проводилось с использованием специальной установки, собранной на основе тиристорного регулятора [1].

Обработка производилась напряжением промышленной частоты, т.е. 50 Гц, но преобразованным с помощью тиристорного регулятора, из-за чего оно изменялось в дискретном разрядно-импульсном режиме. Его величина измерялась амплитудным значением и соответствовала моменту открытия тиристорного регулятора.

В процессе эксперимента изменялись следующие параметры:

- величина градиента напряжения ( $\text{grad } U$ ), В/м;
- время активации цементной суспензии ( $t$ ), мин;
- количество добавки сульфата натрия (СН), %;
- содержание активированной части цемента ( $\text{Ц}_a$ ), %.

Значение уровней и интервалы варьирования факторов, определённые на основе анализа априорной информации, теоретических расчётов и анализа предварительных экспериментальных данных, приведены в табл. 1. Координаты вершин исходного симплекса – в табл. 2.

Условия эксперимента

Таблица 1

Пределы варьирования	Нормализованные факторы			
	$\text{grad } U (x_1)$	$t (x_2)$	СН ( $x_3$ )	$\text{Ц}_a (x_4)$
Основной уровень	130	12	0,8	32
Интервал варьирования	40	4	0,24	12

Таблица 2

Координаты вершин исходного симплекса

Номер опыта	Нормализованные факторы			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	-0,5	-0,289	-0,204	-0,158
2	0,5	-0,289	-0,204	-0,158
3	0	0,578	-0,204	-0,158
4	0	0	0,612	-0,158
5	0	0	0	0,632

За параметр оптимизации принят прирост прочности бетона по сравнению с прочностью контрольных образцов, затворённых водопроводной водой, при одинаковой подвижности бетонных смесей.

Последовательность приготовления бетонной смеси следующая. В часть воды затворения добавлялись суперпластификатор С-3 в количестве 0,5 % от веса активируемой порции цемента и сульфат натрия в количестве, определённом условиями эксперимента. После тщательного перемешивания в диэлектрической ёмкости с электродами на них подавалось напряжение с расчётной величиной градиента и начинался ввод отдозированной порции цемента. По истечении времени активации цементная суспензия использовалась вместо первой порции воды затворения, т.е. её вводили в смесь песка, щебня и другой части цемента. При этом количество цемента в составе суспензии и смеси с песком и щебнем равно количеству цемента контрольного состава. После предварительного перемешивания, добавлялась вторая порция воды с суперпластификатором. Общее количество суперпластификатора С-3 составляло 0,6 % от веса всего цемента.

Для определения параметров активации использовалась схема факторного поиска методом симплекс-планирования. Основные уровни интервалов варьирования факторов в натуральном масштабе приведены в табл. 1, а исходный симплекс – в табл. 3.

Результаты поиска оптимума методом симплекс-планирования представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 3

Исходный симплекс

Номер опыта	$\text{grad } U, \text{ В/м}$	$t, \text{ мин}$	СН, %	$\text{Ц}_a, \%$
1	110	10,84	0,75	30,10
2	150	10,84	0,75	30,10
3	130	14,31	0,75	30,10
4	130	12	0,947	30,10
5	130	12	0,8	39,584

Таблица 4

Симплекс-планирование и результаты опытов при оптимизации параметров активации цементных суспензий (вариант № 1)

№ опыта	Симплекс	Отброшенная вершина	grad $U$	$t$ , мин	СН, %	Ц <sub>с</sub> , %	$\Delta R$
1	1-2-3-4-5	-	110	10,84	0,75	30,10	97
2	1-2-3-4-5	-	150	10,84	0,75	30,10	97
3	1-2-3-4-5	-	130	14,31	0,75	30,10	83
4	1-2-3-4-5	-	130	12	0,947	30,10	86
5	1-2-3-4-5	-	130	12	0,8	39,584	90
6	1-2-6-4-5	3	130	8,53	0,874	34,848	98
7	1-2-6-7-5	4	130	9,11	0,64	37,216	97,5
8	1-2-6-7-8	5	130	7,67	0,707	26,55	102
9	9-2-6-7-8	1	160	7,24	0,736	34,256	106
10	9-2-6-10-8	7	155	8,03	0,894	25,66	105
11	9-11-6-10-8	2	137,5	4,89	0,856	30,56	103
12	9-11-12-10-8	6	161,3	5,38	0,723	23,672	107
13	9-11-12-10-13	8	176,9	5,1	0,898	30,53	109
14	9-14-12-10-13	11	189,1	7,98	0,77	26,50	112
15	9-14-12-15-13	10	188,65	4,82	0,669	31,82	111
16	16-14-12-15-13	9	197,98	4,41	0,794	22,01	114
17	16-14-17-15-13	12	215,02	5,78	0,842	31,76	116
18	16-14-17-15-18	13	218,48	6,40	0,64	25,52	117
19	16-14-17-19-18	15	221,64	7,46	0,854	21,08	115
20	16-20-17-19-18	14	237,46	4,04	0,795	23,68	118
21	21-20-17-19-18	16	248,32	7,44	0,773	29,02	117
22	21-20-17-22-18	19	238	4,37	0,67	33,91	120
23	21-20-23-22-18	17	256,11	5,34	0,598	24,30	121
24	21-20-23-22-24	18	271,47	4,2	0,779	29,94	135
25	25-20-23-22-24	21	253,2	1,54	0,65	29,30	105
26	26-20-23-22-24	25	248,32	7,44	0,773	29,00	117

Таблица 5

Симплекс-планирование и результаты опытов при оптимизации параметров активации цементных суспензий (вариант № 2)

№ опыта	Симплекс	Отброшенная вершина	grad $U$	$t$ , мин	СН, %	Ц <sub>с</sub> , %	$\Delta R$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1-2-3-4-5	-	110	10,84	0,75	30,10	97
2	1-2-3-4-5	-	150	10,84	0,75	30,10	97
3	1-2-3-4-5	-	130	14,31	0,75	30,10	83
4	1-2-3-4-5	-	130	12	0,947	30,10	86
5	1-2-3-4-5	-	130	12	0,8	39,584	90
6	1-2-6-4-5	3	130	8,53	0,874	34,848	98
7	1-2-6-7-5	4	130	9,11	0,64	37,216	97,5
8	1-2-6-7-8	5	130	7,67	0,707	26,55	102
9	1-9-6-7-8	2	100	7,24	0,736	34,256	111
10	1-9-6-10-8	7	105	8,03	0,894	25,50	104

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
11	1 – 9 – 11 – 10 – 8	6	92,5	8,34	1,544	23,36	109
12	12 – 9 – 11 – 10 – 8	1	103,8	4,8	1,19	24,74	113
13	12 – 9 – 11 – 10 – 13	8	70,63	6,54	1,475	27,38	106
14	12 – 9 – 11 – 14 – 13	10	78,44	5,44	1,579	29,36	121
15	12 – 9 – 11 – 14 – 15	13	116,72	6,37	1,05	28,48	117
16	12 – 9 – 16 – 14 – 15	11	106,96	3,57	0,734	35,06	120
17	12 – 17 – 16 – 14 – 15	9	102,93	2,86	1,541	24,56	123
18	18 – 17 – 16 – 14 –	12	98,78	4,32	1,262	33,98	129
19	18 – 17 – 16 – 14 – 19	15	76,84	1,72	1,51	33	108
20	18 – 17 – 16 – 14 – 20	19	116,72	6,37	1,05	28,48	117

Как видно из табл. 4 и 5, после восьмого опыта имеются две равнозначные вершины с худшими показателями, и в дальнейшем поиск раздваивается. По одному варианту, после 24 опыта симплекс «зациклило» и до 26 опыта параметр оптимизации не был улучшен. По второму варианту (табл. 6), после 18 опыта симплекс «зациклило» и до 20 опыта параметр оптимизации не был улучшен. Таким образом, ориентировочно, оптимальными можно считать значения параметров, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Оптимальные параметры активации цементных суспензий

Номер опыта	grad $U$ , В/м	$t$ , мин	CH, %	$C_a$ , %
1	271,47	4,2	0,779	29,94
2	98,78	4,32	1,262	33,98

Как видно из табл. 6, время активации и количество активированной части цемента практически совпадают для двух оптимальных значений градиента напряжения. Наличие двух оптимальных градиентов напряжения позволяет предположить о наличии энергетических уровней, на которых располагаются продукты гидратации. Перевод продуктов гидратации на уровни более удалённые от цементного зерна требует строго определённого количества энергии. Поэтому, кроме двух уже определённых оптимальных градиентов напряжения, возможно существование ещё целого ряда их оптимальных величин.

Время активации и количество добавки активированной части цемента практически совпадают для двух оптимальных значений градиентов напряжений. Это также может служить подтверждением правильности теоретических расчетов в той части, что имеется только определенное значение величины градиента напряжения, при которой происходит перемещение частиц на вполне определенное, но достаточное расстояние. Причем, основываясь на данных (табл. 6) и принимая во внимание тот факт, что величины факторов, приведенные в ней, не полностью совпадают с их оптимальными значениями, можно считать эти два параметра  $t$  и  $C_a$  постоянными для всех градиентов напряжения.

Относительно добавки сульфата натрия анализ результатов опытов с возрастающим градиентом напряжения (см. табл. 4) доказывает, что она взята в оптимальном количестве, так как разница между оптимальным результатом (опыт № 21) и принятым в начале эксперимента составляет всего лишь 0,021 %. Что касается второго варианта (при уменьшающемся градиенте напряжения), то здесь чётко прослеживается тенденция увеличения количества сульфата натрия с уменьшением градиента напряжения обработки. Так, в опытах № 6, 7, 8 (табл. 5) при grad  $U$ , равном 130 В/м, количество добавки сульфата натрия – 0,64 – 0,87 %. В опытах № 13, 14, 19 grad  $U$  составил 70,63 – 76,84 В/м, количество добавки сульфата натрия – 1,475 – 1,51 %. Это означает, что при малых градиентах напряжения для каждого из них необходимо своё количество добавки для уменьшения на вполне определённую величину заряда цементной частицы.

Так как последовательность ввода компонентов может влиять как на подвижность бетонных смесей, так и на прочностные характеристики изделий из них, были изучены следующие варианты введения активированной цементной суспензии:

- совместно со всей водой затворения;
- перед вводом воды затворения;
- после ввода воды затворения.

После определения подвижности были заформованы образцы-кубики, которые хранились при температурно-влажностных условиях и испытывались по истечении 3, 7 и 28 суток. Данные испытания представлены в табл. 7. Во всех опытах использовался один и тот же состав бетонной смеси.

Таблица 7

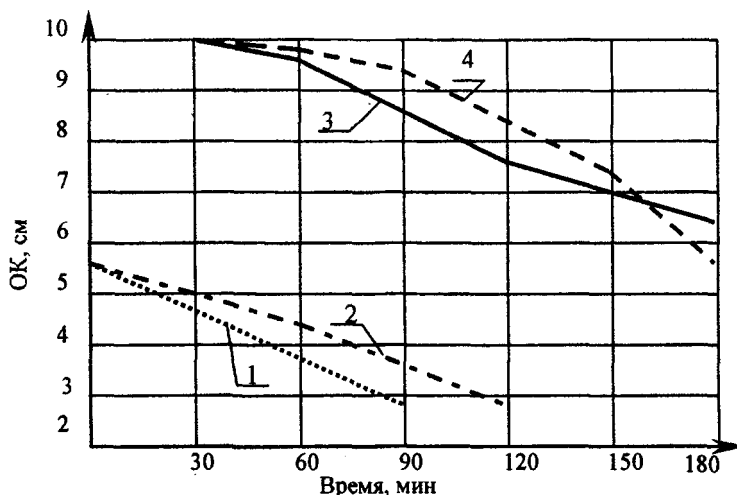
Влияние порядка ввода активированной цементной суспензии на свойства цементных систем

№ опыта	Порядок ввода активированной цементной суспензии	Осадка конуса, см	Возраст бетона, сут, МПа		
			3	7	28
			Предел прочности, МПа		
1	Контрольный состав	5	28,2	30,6	37,8
2	Активированная цементная суспензия совместно с водой затворения	8	34,5	37,1	44,5
3	После ввода первой порции воды затворения	5	28,4	30,5	37,9
4	Перед вводом воды затворения	9,5	35,4	38,1	45,7

Анализ данных табл. 7 позволяет сделать вывод о том, что порядок ввода активированной цементной суспензии имеет первостепенное значение. Для получения наибольшего эффекта суспензия должна вводиться вместо первой порции воды затворения. При этом, наряду с увеличением подвижности бетонной смеси, наблюдается и рост прочностных показателей изделий из них.

Важной технологической характеристикой бетонной смеси является её способность сохранять подвижность во времени, т.е. жизнеспособность. Для её изучения на портландцементе Волковыского завода были изготовлены бетонные смеси, имеющие начальную осадку конуса 5 см и 10 см.

Начальная осадка конуса определялась через 15 мин после приготовления бетонной смеси. Для определения жизнеспособности измерения производились через каждые 30 мин в течение 3 ч. В испытаниях использовались бетонные смеси, приготовленные как с использованием активированной цементной суспензии, вводимой вместо первой порции воды затворения, так и смеси контрольные, приготовленные с тем же количеством компонентов. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке.



Кинетика изменения подвижности бетонной смеси:

- 1 – контрольный состав при начальной подвижности 5 см; 2 – с добавкой активированной цементной суспензии при начальной подвижности 5 см; 3 – контрольный состав при начальной подвижности 9 – 10 см; 4 – с добавкой активированной цементной суспензии при начальной подвижности 9 – 10 см

Как видно из рисунка, скорость потери подвижности в первые 2 часа у бетонных смесей, содержащих активированную цементную суспензию, несколько меньше, чем у смесей, её не содержащих.

### Выводы

1. Электроактивация цементной суспензии электрическим полем, изменяющимся в дискретном разрядно-импульсном режиме, должна выполняться при следующих параметрах обработки: величина градиента напряжения 274 В/м, длительность обработки 4 мин. При этом необходимо подвергать активации 32 % цемента, идущего на приготовление бетонной смеси.

2. Активированная цементная суспензия должна вводиться в смеситель как первая порция воды затворения. При этом наблюдается эффект в виде прироста прочности готового бетона в пределах 30 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 1060, МПК 7 В28С 5/00. Устройство для обработки цементных суспензий / А.П. Шведов.