

## ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Шведов А.П.**, канд. техн. наук, доцент  
(Полоцкий государственный университет)

**Аннотация.** Для повышения прочности бетона широко используются воздействия на бетонные смеси различных полей особенно электрических. Приложенное электрическое поле приводит в движения образующиеся в процессе гидратации ионы. Бетонная смесь, в отличие от типичных электролитов, имеет в своём составе заряженные цементные частицы, которые изменяют силы воздействия на ионы от прилагаемого электрического поля. Поэтому при разработке методов электроактивации необходимо отрабатывать режимы с учётом внутренних электрических полей и их изменения во времени.

Одним из вариантов повышения прочности бетона и ускорения твердения может быть использование добавок готовых центров кристаллизации. Наиболее эффективным является применение затравок, являющихся кристаллохимическими аналогами продуктам гидратации цемента. Идентичными могут быть продукты, получаемые в условиях гидратации цемента бетонной смеси. Обеспечить соответствующие условия можно при двустадийном вводе цемента в процессе приготовления бетонной смеси, а именно первая часть вводится совместно с заполнителями, а вторая – в виде активированной суспензии с водой затворения. При этом суспензию необходимо использовать как среду для образования активных затравок.

С учетом того, что на поверхности цементных частиц после затворения цемента водой уже через 30с образуются продукты гидратации  $C_3A$  [1], которые осаждаются на цементных частицах в высокодисперсном состоянии, а раствор в это время насыщен  $Ca(OH)_2$  и сульфатом кальция, имеются условия создания устойчивой трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция в процессе твердения цемента без дополнительного ввода гидросульфоалюмината кальция. Причем полученный таким образом гидросульфоалюминат кальция будет находиться в высокодисперсной форме и поэтому должен быть гораздо эффективнее добавок типа ГСАК-3.

В работе [2] указывается на то, что в формировании зародышей принимают участие не только отдельные молекулы или ионные пары, но и агрегаты, состоящие из 2 или 3 молекул. В таких условиях возникновение дефектов в зародышах неизбежно. О возникновении дефектов на ранней стадии и разной прочности новообразований свидетельствуют и данные работ [2,3]. Это подтверждается и фактической прочностью отдельных кристаллов, которая по данным работы [2], достигает значений порядка  $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$  МПа. Расхождения между фактической и теоретической прочностью объясняются об-

разующимися, как во время кристаллизации, так и во время деформации, дефектами.

Для ликвидации образующихся дефектов и отвода от поверхности цементных частиц продуктов гидратации можно применить энергию электрического поля. Определим, какой величины должна быть напряжённость используемого поля, которое сможет перемещать продукты гидратации от цементных частиц, с учётом действия сил поля, создаваемого поверхностью частицы при образовании на ней заряда в процессах её гидратации.

В типичных электролитах при наложении электрического поля перенос реагирующего вещества осуществляется по трем механизмам [4]: молекулярная диффузия, миграция частиц в электрическом поле, конвекция.

Согласно кинетической теории электропроводности [5], при наложении поля происходит не непрерывное движение ионов в водной среде, а через последовательную серию скачков из одного промежуточного состояния равновесия в другое. Этот переход связан с преодолением энергетического барьера. Движение возможно только при определенном количестве дополнительной энергии, которую продукты гидратации могут получить в момент соударения от ионов, движущихся с ускорением при наложении электрического поля.

При наложении электрического поля ионы получают ускорение, их движение описывается следующим уравнением:

$$m_i \cdot a_i = g_i \cdot \text{grad}U_y - F_{\text{тр}} \quad (1)$$

где  $m_i$  - масса иона, кг;

$a_i$  - ускорение, получаемое ионом в момент приложения электрического поля,  $\text{м/с}^2$  ;

$g_i$  - заряд иона, Кл;

$\text{grad}U_y$  - градиент напряжённости прилагаемого электрического поля, В/м;

$F_{\text{тр}}$  – результирующая сила, действующая со стороны раствора (в её состав обычно включают электрофоретическую силу, силу релаксационного торможения и силу поля, создаваемого частицей), Н.

Электрофоретическая сила [5] связана с существованием ионной атмосферы и её перемещением в сторону, противоположную движению центрального иона.

$$F_{\text{эл.ф.}} = K_i \cdot (V_i + V_{ia}), \quad (2)$$

где  $K_i$  - коэффициент трения, который в соответствии с законом Стокса равен

$$K_i = 6\pi r \eta, \quad (3)$$

где  $r$  - радиус иона, м;

$\eta$  - вязкость растворителя, Па\*с;

$V_i$  и  $V_{ia}$  - скорости движения иона и ионной атмосферы, м/с.

За счёт релаксационного эффекта ослабляется напряжённость внешнего электрического поля:  $U - \Delta U$  [4]

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{g_i^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 k T r_g}, \quad (4)$$

где  $\Delta U$  - увеличение напряжённости возмущающего поля, В/м;

$U$  - напряжённости возмущающего поля, В/м;

$\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость;

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная  $8,85 \cdot 10^{-12}$ , Ф/м;

$k$  - константа Больцмана;

$T$  - температура раствора,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$r_g$  - радиус Дебая

(5)

$$r_g = \frac{\sqrt{\epsilon\epsilon_0 k T}}{\sqrt{\sum_i n_{i0} z_i^2 e_0}}$$

где  $n_{i0}$  - объёмная концентрация (связана с локальным уравнением Больцмана);

$z_i$  - валентность иона;

$e_0$  - заряд иона.

Объёмная концентрация электролита равна

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (6)$$

где  $W$  - работа, которую нужно затратить против усреднённых по времени электрических и других сил, чтобы вызвать изменение концентрации этого иона по сравнению с  $n_{i0}$ .

Используя модель Дебая-Хюккеля с учётом только кулоновских сил получаем

$$W = Z_i e_0 \psi, \quad (7)$$

где  $\psi$  - потенциал центрального иона на расстоянии от него, на котором объёмная концентрация равна  $n_i$ .

С учётом (4-7) выражение будет иметь следующий вид

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{g_i \sqrt{\frac{\sum_i z_i^2 e_0^2 n_{i0} e^{-\frac{z_i e_0 \psi}{kT}}}{85 \epsilon \epsilon_0 k T \sqrt{\epsilon \epsilon_0 k T}}}}{85 \epsilon \epsilon_0 k T \sqrt{\epsilon \epsilon_0 k T}} \quad (8)$$

В отличие от так называемых истинных электролитов, бетонная смесь сразу после затворения имеет внутренние электрические поля, создаваемые зёрнами цемента в процессе гидратации клинкерных минералов. Автор работы [3] предлагает функцию распределения электрического потенциала в диф-

фузном слое сольватной оболочки в зависимости от расстояния ( $z$ ) от поверхности твёрдой фазы.

$$Z = \frac{1,15}{F_a} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 RT}{65 C_{\infty}}} \lg \frac{\psi_0}{\psi} \quad (9)$$

где  $F_a$  - число Фарадея;

$R$  - универсальная газовая постоянная;

$C_{\infty}$  - концентрация раствора, г. моль;

$\psi_0$  - электрический потенциал на поверхности частицы, тогда

$$\psi = \psi_0 e^{-2ZF_a} \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}} \quad (10)$$

Следовательно, сила, действующая на заряд, будет равна

$$F_{ц} = g_i \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a} \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}})}{z} \quad (11)$$

Выражение (11) с использованием значений формул (2), (8) и (11) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} m_i \cdot a_i &= g_i \cdot \text{grad} U_y - 6\pi\eta(V_i + V_{ia}) - g_i \cdot \text{grad} U_y = \\ &= \frac{g_i^2 \sqrt{\frac{\sum z_i^2 e_0^2 n_i e}{RT}}}{8\pi\epsilon \epsilon_0 RT \sqrt{\epsilon \epsilon_0 RT}} - g_i \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a} \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}})}{z} \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что ускорение ионов зависит от его расстояния до клинкерной частицы. С учётом только первого и последнего слагаемых, так как второе и третье также уменьшают напряжённость подводимого электрического поля, определим взаимосвязь градиента напряжённости подводимого электрического поля и величины ускорения, получаемого ионом, а также его расстояние от цементной частицы.

$$\text{grad} U_y = \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a} \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}})}{z} \quad (13)$$

Из выражения (13) можно найти расстояние иона от поверхности цементной частицы, на котором, в зависимости от величины градиента подаваемого поля, его ускорение будет равным нулю. В этом случае ионы, получаемые в процессе гидратации, под действием электрического поля будут ориентироваться в поле, но не удаляться от цементной частицы. Как показывает расчёт, при наложении электрического поля с  $\text{grad} U_y = 600 \text{ В/м}$  ускорения можно получить только ионы, находящиеся на расстоянии  $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , а это плёнки связанной воды (куда входит и диффузный слой) [6], но под действием такого поля бетонная смесь быстро закипит. Поэтому для про-

ведения электроактивации для отвода ионов от поверхности цементных частиц или разрушения дефектных структур, необходима большая напряжённость электрического поля и кратковременное его действие, то есть необходимы поля определённого режима и с определённой частотой.

**Выводы.** 1. Проведен анализ воздействия электрического поля на ионны бетонной смеси с учётом полей, создаваемых гидратирующими цементными частицами. 2. Выполнены расчёты, показывающие, что удаляться от цементной частицы могут только ионы, расположенные от неё на расстоянии  $10^{-7}$  м и более. 3. Для проведения электроактивации необходимы поля определённого режима и с определённой частотой.

**Литература.** 1. Электрические свойства бетона / А.Ф.Бернацкий, Ю.В.Целебровский, В.А.Чунцин; под ред. Ю.Н.Вершинина. - М.: Энергия, 1980.- 208 с. 2. Полак А.Ф. Теория гидратации вяжущих веществ // Сб. тр. НИИпромстрой. - Вып.17, т.2.- М., 1976.- С. 54 -106. 3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона.- М.: Стройиздат, 1981.- 465 с. 4. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия.- М.: Высшая школа, 1984.- 518 с. 5. Дамаскин Б.Б., Петрий Д.А.Электрохимия.- М.:Высшая школа, 1987.- 295 с. 6. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реалогия бетонной смеси и прессвакуумбетона.- Минск: Наука и техника, 1977.- 231 с.