

## ЗАЩИТА ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА УПЛОТНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ НЕОПАЛУБЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Саназ Экбалник, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ГП «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.)

**Аннотация.** Технология и организация выполнения работ по уходу за твердеющим в воздушно-сухих условиях бетоном представляет собой комплекс мероприятий, направленных на защиту неопалубленных поверхностей строительных конструкций (изделий) от неконтролируемого испарения воды затвердения бетона, ухудшения его структурных характеристик и взаимосвязанных с ними физико-технических свойств. В материале статьи рассмотрены теоретические аспекты и экспериментальное подтверждение диффузионно-фильтрационного проникновения вещества сульфата алюминия (нанесенного в виде раствора на поверхность) внутрь бетона, что обеспечивает защиту его от испарения влаги за счет уплотнения структуры и роста непроницаемости обрабатываемых неопалубленных поверхностей конструкций.

**Введение.** Процесс твердения цементного бетона, приготовленного из пластичной бетонной смеси (что характерно для монолитного строительства и для большинства технологий производства сборного железобетона), сопровождается постепенным переходом цементного теста из пластичного в твердофазное состояние цементного камня в затвердевшем бетоне. Этот процесс сопровождается постоянным перераспределением жидкой фазы в объеме бетона, а формирующиеся кристаллогидраты алюминатов, ферратов и силикатов исходного цемента характеризуются плотностью значительно большей, чем плотность замещаемой ими воды и, соответственно, меньшим объемом. Развитие процесса их формирования проявляется в эффекте контракции [1], а в реагирующей системе «цемент-вода» возникает явление «внутреннего» вакуума, который по данным источников [2, 3] может за 24 часа твердения для цементного камня достичь степени разрежения в 80 мм рт. столба, а для цементно-песчаного раствора (т.е. растворной части бетона) ~ 9-11 мм рт. столба, или в системе «СИ»:  $9,0:760 \times 1,013 \times 10^5 = 1199,5 \sim 1200$  Па, и, тем самым, создает условия для сорбции наносимой на поверхность жидкости вглубь бетона. Следует ожидать, что водорастворимое вещество уплотняющей структуру бетона добавки сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), проникая вглубь, будет вступать в реакцию с продуктами гидролиза клинкерных минералов цемента, в результате которых возрастут темп формирования и плотность формирующейся структуры цементного камня на некоторую глубину слоя защищаемого бетона. За этот счёт усложнятся условия миграции жидкой фазы из объема бетона к поверхности испарения, что обеспечит условия, благоприятные для твердения цемента и, соответственно, для формирования более плотной и непроницаемой структуры цементного камня и бетона в целом.

**Теоретико-практические основы защиты бетона.** Количественную оценку глубины и времени проникновения защитного состава в бетон (с достаточной, на наш взгляд, для инженерных расчётов точностью) можно дать с учётом фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [4], а на этом основании обеспечить разработку режимов ухода за бетоном: время нанесения защитных составов, расход вещества, периодичность нанесения в зависимости от условий твердения и др.

Для нашего случая “безнапорной фильтрации” с поверхности, с учётом, того обстоятельства, что для фильтрации жидкости без искусственно создаваемого избыточного давления, как это имеет место при сорбции твердеющим цементом раствора реагентов в виде уплотняющих структуру добавок, градиент давления ( $dP/dl$ ) будет зависеть от эффекта контракции и возникающего при этом разрежения в объёме цементного теста в бетоне. В общем случае обозначим его « $P_c$ » (давление, создаваемое силами сорбции). Тогда скорость движения жидкости в порах может быть определена из выражения

$$W = \beta \cdot \frac{P_c d_{\text{э}}^2}{\rho_{\text{ж}} \mu_{\text{д}} \ell} \cdot \left[ \frac{m_{\text{э}}}{1 - m_{\text{э}}} \right]^2, \text{ м/с.}$$

Приняв условие, при котором раствор реагента, нанесенный на поверхность бетона, при средней скорости движения в порах « $W$ » будет проникать на глубину « $l$ » за время « $\tau$ », то есть:  $l = W \cdot \tau$ , подставив выражение (1) в эту зависимость и выразив плотность жидкости (раствора) через силу тяжести, т.е. в размерности –  $\rho_{\text{ж}}$ , Н/м<sup>3</sup>, получим

$$\ell = \frac{m_{\text{э}} d_{\text{э}}}{1 - m_{\text{э}}} \cdot \sqrt{\frac{\beta P_c \tau}{\rho_{\text{ж}} \mu_{\text{д}}}}, \text{ м}$$

Полученная формула отличается от обоснованной в работе [5] зависимости для расчета глубины (расстояния) проникновения жидкости в уплотненные сухие смеси значением и сущностью «давления сорбции»  $P_c$ . Ее можно упростить до удобного для ведения инженерных расчётов вида. Так, в частности, отношение:  $m_{\text{э}} / 1 - m_{\text{э}}$ , есть не что иное, как отношение объёма пор к объёму твёрдой фазы в единице их суммарного объёма и соответствует понятию *коэффициента пористости цементного теста* “ $\epsilon_{\text{пт}}$ ”, детально рассмотренному и установленному в работах И.Н. Ахвердова [6] для широкого диапазона КнГ цемента в зависимости от водоцементного отношения цементного теста.

Значение эффективного (усреднённого) размера (диаметра) цементных частиц на основании данных работ [7] может быть приведено к некоторому *фиксированному среднему расчётному значению*  $d_{\text{э}} \sim 11,5$  мкм, что практически совпадает с оценкой, данной в работах [7].

*Расчётное значение “избыточного давления”*  $P_c$ , возникающего за счёт сил сорбции (вследствие перераспределения жидкой фазы и развития контракции в объёме цементного теста) и представляющего собой перепад давлений между окружающей средой (атмосферное давление) и давлением раз-

режения (за счёт развивающейся миграции и связывания цементом воды затворения) соответствует:  $P_c \sim 1200$  Па, для наиболее важных с позиций ухода за свежееотформованным бетоном первых 24-48 ч его твердения.

На основании изложенного и ранее приведенных данных, приняв (с достаточной для практических расчетов точностью) величину расчётного эффективного «диаметра» зерна цемента:  $d_z \sim 11,5 \cdot 10^{-6}$ , м и введя величину перепада давления от вакуума:  $P_c$ , Па ( $\text{Н/м}^2$ ), плотность используемого раствора:  $\rho_{ж}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , а его вязкость:  $\mu_{\partial}$ ,  $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ , а также коэффициент пористости цементного теста:  $\varepsilon_{ц.т.} = m_3 / (1 - m_3)$ , доли ед. и значение поправочного коэффициента  $\beta$ ,  $\text{Н/м}^3$ , формула в общем случае при размерности мм, приобретает вид

$$\ell = 11,5 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \sqrt{\frac{P_c \tau}{\rho_{ж} \mu_{\partial}}}, \text{ мм.}$$

В частности, при минимальном значимом давлении:  $P_c \sim 1200$  Па, для обработки свежееотформованного бетона при поправочном коэффициенте  $\beta_{св}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , а также для ухода за бетоном после снятия опалубки (бортоснастки) при поправочном коэффициенте  $\beta_{оп}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , при  $\tau = 86400$  сек (24 часа) зависимость соответственно преобразуется в вид:

$$\ell_{св} = 117 \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\beta_{св}} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \mu_{\partial}}, \text{ мм.}$$

$$\ell_{оп} = 117 \cdot \varepsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\beta_{оп}} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \mu_{\partial}}, \text{ мм.}$$

На основании накопленных экспериментальных данных определено, что для обработки свежееотформованного бетона коэффициент  $\beta^{1/2}_{св} \sim 2,42 \cdot 10^{-2}$ , а при уходе за бетоном после снятия опалубки  $\beta^{1/2}_{оп} \sim 1,36 \cdot 10^{-2}$   $\text{Н/м}^3$ . В результате после введения этих значений коэффициента  $\beta$  в выше приведенные формулы для случая ухода за свежееотформованным бетоном уплотняющими структуру веществами (растворами, характеризующимися известными  $\rho_{ж}$  и  $\mu_{\partial}$ ) или после снятия опалубки, соответственно, они упрощаются до вида:

$$\ell_{св} = 2,83 \varepsilon_{ц.т.} \sqrt{1 / \rho_{ж} \mu_{\partial}}, \text{ мм.}$$

$$\ell_{оп} = 1,59 \varepsilon_{ц.т.} \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_{\partial}} \text{ мм}$$

Согласно полученным (с учётом сделанных допущений и упрощений) зависимостям глубина проникновения вещества уплотняющей добавки вглубь объёма цементного теста в бетоне связана прямой зависимостью с коэффициентом его пористости и обратной - с плотностью и динамической вязкостью раствора-фильтрата, что не противоречит физико-химической сути явления массопереноса.

**Экспериментальная проверка (таблица и рисунок) расчётных зависимостей.** Для оценки соответствия расчётных данных о глубине проникновения вещества уплотняющей структуру добавки фактическим значениям был осуществлён эксперимент (кроме наблюдений за этими результатами на протяжении всего периода исследований), результаты которого отражают данные таблицы и иллюстрируют фотографии образцов цементного камня (размеры 20 x 20 x 20 мм), представленные на рисунках 1 и 2.

Таблица

Способ обработки поверхности и расчётная формула	Расчётная толщина слоя, мм	Экспериментальные данные о толщине слоя цементного камня, (мм) через период времени, сут			
		1	3	7	28
По свежеотформованной	2,25	2,231	2,283	2,338	2,369
		2,205	2,261	2,316	2,345
		2,229	2,295	2,339	2,377
		2,277	2,309	2,388	2,398
		2,306	2,320	2,348	2,369
		2,218	2,290	2,355	2,389
		2,245**	2,293**	2,347**	2,375**
После распалубки	1,26	1,240	1,325	1,363	1,375
		1,282	1,316	1,359	1,368
		1,247	1,295	1,339	1,359
		1,219	1,275	1,309	1,333
		1,283	1,339	1,336	1,366
		1,280	1,320	1,353	1,383
		1,258**	1,312**	1,343**	1,362**

Примечание: Среднее значение толщины слоя по 6 образцам с округлением до 1 мкм.

Оценка глубины проникновения вещества защитного состава в начальный период после нанесения (особенно свежеотформованного цементного теста, а в последующих экспериментах – раствора и бетона) оказалась практически невозможной, включая попытку окрашивать бесцветные растворы испытуемых защитных составов. В этой связи оценку глубины проникновения в

Во всех случаях защитный состав наносили распылением на обрабатываемую поверхность дважды (что наиболее эффективно). При этом второе нанесение состава осуществляли после “высыхания” обрабатываемой поверхности (матовая поверхность без блеска плёнки жидкости на ней). Для свежеотформованного бетона повторное нанесение осуществляли через ~ 20...30 мин, а для распалубленного – через ~ 10...15 минут.

В качестве защитного состава для данной серии экспериментов использовали 5%-й водный раствор  $Al_2(SO_4)_3$ , характеризующийся при температуре 20°C общеизвестными справочными данными о плотности и динамической вязкости, составляющими для указанной концентрации и температуры:  $\rho_{ж} \sim 1051$

$\text{H}/\text{м}^3$ ;  $\mu_{\partial} \sim 0.001416 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ , что необходимо для теоретического расчёта по формулам (6) и (7). Температура обрабатываемых образцов соответствовала  $\sim 20^\circ\text{C}$  ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

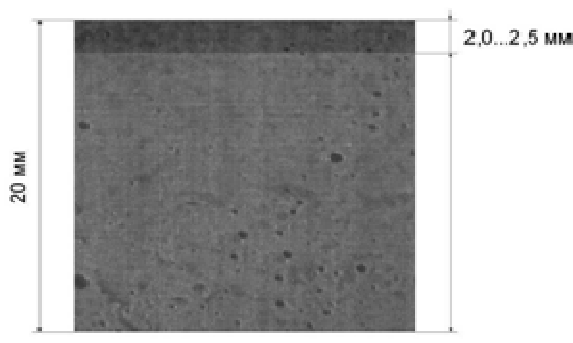


Рисунок 1 – Образцы цементного камня, обработанные по свежееотформованному цементному тесту

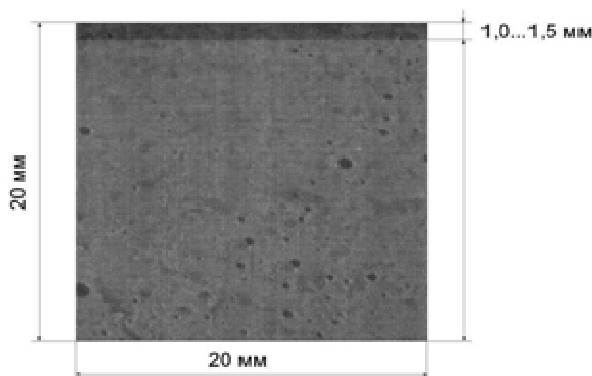


Рисунок 2 – Образцы цементного камня, обработанные после распалубки

**Заключение.** На основании данных таблицы и рисунка можно сделать вывод об адекватности зависимостей (6) и (7) и что они, в общем, дают возможность оценить вероятную глубину проникновения в цементный камень бетона вещества защитного состава и, соответственно, толщину формирующегося слоя цементного камня с уплотнённой и менее проницаемой структурой. Так, при обработке свежееотформованного цементного теста эта разница по расчетным и средним фактическим значениям 6-ти образцов составила:  $(2,375 - 2,245) : 2,245 \cdot 100 \sim 5,8 \%$ , а при обработке распалубленной через 24 часа поверхности цементного камня:  $(1,362 - 1,258) : 1,258 \cdot 100 \sim 8,3 \%$ . А по наиболее отличающимся значениям экспериментальных данных их отклонение к 28 суткам твердения от расчётных по формулам (3.17) и (3.18) составило для свежееотформованного цементного теста:  $[(2,398 - 2,25) : 2,25 \cdot 100 \sim 7 \%$  и для обработки после распалубки:  $(1,385 - 1,26) : 1,26 \cdot 100 \sim 9 \%$ . Это в целом позволяет считать возможным использование зависимостей (6) и (7) для практических оценочных расчётов.

**Литература.** 1. Бруссер, М.И. Исследование структурной пористости бетона и факторов её определяющих. Автореф. дис. к.т.н. 08.00.05 – Строительные материалы и изделия, – М., 1971. – 19 с. 2. Скрамтаев, Б.Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи./Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям. Ч.III. Усовершенствование технологии бетона. Гос.из-во.строит.лит. –М.-Л.: 1949. – С. 3 – 25. 3. Шестоперов, С.В. Долговечность бетона. – М.: Автотранспорт, 1955. – 480 с. 4. Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М. – Л.: Гостехиздат, 1947. – С. 11–73. 5. Батяновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формования. - Мн.: НП ООО "Стринко", 2002. – С. 108-112. 6. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981.-464 с. 7. Блещик, Н.Н. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона.- Минск: Наука и техника, 1977. – 230 с. 8. Эгбалник, С. Теоретико-практические аспекты ухода за твердеющим цементным бетоном / С. Эгбалник, Э.И. Батяновский // Наука и техника. – Минск, 2013. – №3 . – С. 22–27.