

УДК 666.97;693.54

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ В ТВЕРДЕЮЩИЙ БЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПЛОТНЯЮЩЕГО ЕГО СТРУКТУРУ СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ

канд. техн. наук С.М. ЭГБАЛНИК  
(ГП «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева», Минск)

В статье приведены результаты теоретических исследований первичной защиты твердеющего бетона с составами на основе недефицитной и недорогой добавки сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), которая стандартизирована и разрешена к применению для бетонных изделий. Приводятся разработанные математические зависимости глубины проникновения в бетон предложенных защитных составов, базирующиеся на фундаментальных закономерностях теории фильтрационной гидравлики и физико-химических явлениях, происходящих в твердеющем цементном камне, обусловленных процессом разрежения, вызывающим сорбирование нанесенного на его поверхность защитного раствора. В полученных зависимостях взаимосвязаны факторы: давление  $P_c$ , н/м<sup>2</sup> (Па), вызванное разрежением, возникающим в объеме бетона; время воздействия  $\tau$ , с; свойства наносимого раствора (фильтра) и его динамической вязкости  $\mu_d$ , Н·с/м<sup>2</sup>; плотность  $\rho_{ж}$ , н/м<sup>3</sup>; характеристики пористости фильтрационной среды (коэффициент пористости цементного теста  $\varepsilon_{ц.т.}$ , доли ед., и поправочный коэффициент физической неопределенности указанных свойств  $\beta$ , н/м<sup>3</sup>). Зависимости позволяют рассчитать (оценить) глубину проникновения ( $l$ , мм) вещества защитного состава в пористую фильтрационную среду защищаемого бетона. На основе экспериментально-теоретической апробации предложенных зависимостей они аппроксимированы для использования в инженерных расчетах посредством введения поправочных коэффициентов  $\beta$ , равных для случая ухода за свежееотформованным бетоном  $\beta_{св} \sim 2,42 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>3</sup> и после распалубки изделий (конструкций)  $\beta_{он} \sim 1,36 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>3</sup>. Экспериментально подтверждена достоверность предложенных расчетных зависимостей для оценки глубины проникновения вещества защитного состава (на примере 5%-й раствора  $Al_2(SO_4)_3$ ) как при обработке свежееотформованного бетона, так и в случае обработки поверхности бетона после распалубки. Отклонение между теоретическими (расчетными) и экспериментальными данными составляет не более 9%, что обеспечивает достаточную для оценочных расчетов точность предложенных аналитических зависимостей с требуемым квантилем вероятности в 5% ( $\alpha = 0,95$ ).

**Ключевые слова:** первичная защита твердеющего бетона, цементный камень, защитный состав с добавкой из сульфата алюминия, фильтрационная теория гидравлики, инженерно-теоретические зависимости, достоверность, эффекты диффузии, контракции, разрежения.

**Введение.** Температура саморазогрева твердеющего бетона в летний период в белорусском регионе достигает 50 °С и более. Поэтому отсутствие соответствующих мероприятий по уходу за бетоном с корректировкой теплового режима в начальный период твердения, как правило, приводит к снижению его качества. В этой связи совершенствование методов защиты бетона как в естественных условиях (под воздействием солнечной энергии), так и в заводских (от дополнительных источников тепла) очень актуально, т.к. напрямую связано с надежностью обеспечения его проектных (нормативных) свойств: водопоглощения, водонепроницаемости, морозостойкости и защитной способности по отношению к стальной арматуре (для железобетонных конструкций).

Традиционно защита твердеющего бетона осуществляется посредством нанесения на его поверхность веществ, обладающих гидрофобным эффектом, которые проникают в него на некоторую глубину, создавая защитный барьер по внешнему контуру его поверхности, затрудняющий миграцию воды в зону испарения. Однако в результате этого замедляются реакции взаимодействия вяжущего с водой. Как следствие, обработанный ими бетон характеризуется наличием внешнего медленно твердеющего и набирающего прочность слоя, что ослабляет как сцепление «старого» и «нового» бетона в процессе его твердения, так и сцепление с материалами последующей отделки строительных конструкций, что ухудшает ее качество.

В связи с этим предложен более технологичный, недорогой и менее трудоемкий прием (технология) нанесения на обрабатываемую поверхность бетона (свежеуложенного или после снятия опалубки) нового защитного состава вещества (раствора) на основе сульфата алюминия [1] посредством его распыления, например, сжатым воздухом. Предлагаемые состав и способ позволяют организовать уход за бетоном независимо от конфигурации конструкций и ориентации в пространстве защищаемых поверхностей. Такой вариант защиты ускоряет процесс твердения цемента во внешнем (защищаемом) слое бетона (в отличие от использования гидрофобизирующих веществ) и не ухудшает качества сцепления «старых–новых» слоев бетона в т.ч. с материалами отделки, как это имеет место при использовании пленкообразующих составов. Прием уплотнения структуры защищаемого слоя бетона позволяет ухаживать как за свежееуложенным бетоном, так и после снятия с него опалубки, используя вариант нанесения защитных составов методом напыления. Кроме того, он позволяет купировать проблему

неконтролируемого саморазогрева бетона и может использоваться в сочетании, например, с укрытием поверхности разнообразными пленками для создания парникового эффекта и тепловой интенсификации роста прочности бетона или в сочетании с влажностными методами ухода.

В данной статье приводятся результаты выполненной работы по теоретическому исследованию (оценке) первичной защиты твердеющего бетона составами, ограничивающими или предотвращающими испарение воды затворения за счет воздействия на структуру его поверхностных слоев. Работа выполнена в БНТУ. Руководитель работы – профессор, доктор технических наук Э.И. Батяновский.

### 1. Разработка инженерно-аналитического метода оценки глубины проникновения вещества защитного состава в бетон с использованием добавки $Al_2(SO_4)_3$

**Теоретические основы метода.** Физико-химические основы разработанной технологии [1] и расчета первичной защиты бетона базируются на физических явлениях массо-влажнопереноса, сопровождающих начальный период твердения цементного камня, а также на химическом взаимодействии наносимых на защищаемую поверхность веществ с продуктами гидролиза и гидратации клинкерных минералов цемента, в результате которых образуются новые соединения, уплотняющие структуру камня на некоторую глубину. Сужая или кольматируя (закупоривая) каналы движения жидкости, указанные выше явления приводят к уменьшению потерь испаряемой воды затворения, обеспечивая благоприятные условия для твердения (формирования более плотной и непроницаемой структуры) цементного камня бетона в целом.

Физические процессы, протекающие в свежотформованном бетоне, вызваны как избыточным количеством жидкости по условиям формования, так и развитием контракционно-седиментационных эффектов во времени [2; 3 и др.]. Известно [4; 5 и др.], что контракционные процессы сопровождаются появлением разрежения в объеме бетона. При этом формирование структуры цементного камня в твердеющем бетоне связано также с процессом постоянного перераспределения и перемещения его жидкой фазы, приводящим к появлению системы сообщающихся пор, обладающих способностью сорбировать (капиллярный подсос) контактирующую с поверхностью пор бетона воду. Все это в целом создает необходимые и достаточные условия для реализации приема защиты твердеющего бетона при нанесении соответствующих химических реагентов в виде водных растворов на открытые поверхности возводимых конструкций. Таким образом, проникновение защитного вещества внутрь объема формирующейся структуры во внешнем слое цементного камня (бетона) обусловлено как диффузией ионов молекул, растворенных в воде, так и массопереносом (фильтрацией) защитного раствора сквозь пористую среду цементного теста, трансформирующегося в цементный камень, под воздействием контракционных явлений и эффекта разрежения.

Это особенно эффективно в связи с тем, что введение в цементное тесто уплотняющей добавки (в частности, сульфата алюминия) сопровождается ускорением его схватывания. Вопросы количественной оценки рассматриваемых процессов и режимов ухода за бетоном, регламентирующих время нанесения защитных составов, расход вещества, периодичность нанесения в зависимости от условий твердения и др., в частности, глубины и времени проникновения защитного состава в бетон (с достаточной для инженерных расчетов точностью), решаются на основе фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [7; 8].

*Теоретические основы процесса фильтрации жидкости в пористых средах* были заложены в начале XIX в. работами Пуазейля, Хагена и позднее развиты Дарси, предложившим экспериментальную зависимость, отражающую фундаментальную закономерность фильтрации воды через пески (пористые среды), названную в его честь линейным законом Дарси. Закон адекватно выражает линейный ламинарный характер движения поровой жидкости при относительно малых градиентах давления и скоростях потока не только при фильтрации воды через грунт, но и в других пористых средах, который описывается формулой (1), широко используемой в современной фильтрационной гидротехнике:

$$V_{\phi} \approx \frac{K_{\phi}}{\rho_{ж}} \cdot \frac{dP}{dl} \quad (1)$$

Для фильтрации жидкости в горизонтальном и вертикальном направлениях, формула (1) имеет вид

$$V_{\phi} \approx \frac{K_{\phi}}{\rho_{ж}} \cdot \frac{d(P \pm \rho_{ж} \cdot h)}{dh} \quad (1a)$$

где  $V_{\phi}$  – скорость фильтрации жидкости или газа;

$K_{\phi}$  – коэффициент проницаемости среды (коэффициент фильтрации по Козени);

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости или газа;

$dP$  – перепад давления на длине участка фильтрационной среды  $L$  или его высоте  $h$ .

Коэффициент фильтрации  $K_{\phi}$  в формуле (1) обуславливает скорость фильтрации, м/с, при гидравлическом уклоне, равном 1, то есть когда имеет место потеря единицы давления на единицу длины, и зависит от свойств фильтрационной среды и фильтрующейся жидкости.

Академик Л.С. Лейбензон [7] предложил заменить в формуле коэффициента фильтрации по Козени (2), используемого в зависимости (1), параметр истинной пористости на параметр эффективной пористости  $m_3$ , представив ее в следующем виде:

$$K_{\phi} = \beta \cdot \frac{d_3^2}{\mu_d} \cdot \frac{m_3^3}{(1-m_3)^2}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – безразмерный опытный коэффициент, Н/м<sup>3</sup>, принимаемый для фильтрации воды в зернистой среде (песок) по Козени равным 8,2, а по данным работы [6] для цементосодержащих бетонных смесей – 11,4;

$d_3$  – эффективный (усредненный) диаметр частиц твердой фазы, слагающих фильтрационную среду, м;

$\mu_d$  – динамическая вязкость фильтрующей жидкости, Н·с/м<sup>2</sup>;

$m_3$  – эффективная пористость фильтрационной среды, доли единицы.

Подстановкой в формулу (2) зависимости (1) получено выражение для скорости фильтрации

$$V_{\phi} = \beta \cdot \frac{d_3^2}{\rho_{ж} \cdot \mu_d} \cdot \frac{m_3^3}{(1-m_3)^2} \cdot \frac{dP}{dl}, \quad (3)$$

Учитывая то, что связь между пористостью среды  $m$ , скоростью фильтрации  $V_{\phi}$  и средней скоростью движения жидкости в порах  $W$  выражается в теории фильтрационной гидравлики зависимостью

$$W = V_{\phi} / m, \quad (4)$$

профессор Э.И. Батыновский [6; 9], опираясь на работы академика Л.С. Лейбензона, В.И. Щелкачева, Р. Коллинза [7 и др.], уточнил зависимость для скорости фильтрации применительно к скорости фильтрации в порах растворов, фильтрующихся через твердеющие бетоны.

Подставив формулу (3) в выражение (4) он получил зависимость для скорости движения раствора в порах:

$$W_{\phi} = \beta \cdot \frac{P_c \cdot d_3^2}{\rho_{ж} \cdot \mu_d \cdot l} \left[ \frac{m_3^2}{(1-m_3)^2} \right]^2, \quad (5)$$

где  $P_c$  – давление разрежения в порах в результате сорбции и эффекта контракции в твердеющем бетоне с учетом уплотняющих добавок.

Далее, исходя из того, что защитный раствор реагента, нанесенный на поверхность твердеющего бетона, при средней скорости движения в порах  $W_{\phi}$  будет проникать в него на глубину  $l$  за время  $\tau$ , т.е.  $\tau = l / W_{\phi}$ , и подставляя сюда выражение (5), он получил зависимости относительно  $\tau$  (6) и  $l$  (7):

$$\tau = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot \mu_d \cdot l^2}{P_c \cdot d_3^2} \cdot \left( \frac{1-m_3}{m_3} \right)^2, \text{ с}; \quad (6)$$

$$l = \frac{m_3 \cdot d_3}{1-m_3} \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_d}}, \text{ м}. \quad (7)$$

Аналитические зависимости (6) и (7) имеют большое практическое значение, т.к. дают возможность оценить взаимосвязь времени и глубины проникновения фильтрата в твердеющий бетон и обеспечить разработку режимов ухода за бетоном, рассчитать время и глубину проникновения фильтрата в твердеющий бетон, периодичность нанесения защитных растворов на поверхность возводимых конструкций в зависимости от его свойств (вязкости, плотности), характеристик фильтрационной среды (пористости, дисперсности (крупности) частиц), условий твердения и используемых добавок.

## 2. Аппроксимация теоретических решений для инженерных расчетов с использованием уплотняющего структуру бетона сульфата алюминия

Рассмотрим зависимости (6) и (7) с позиции использования в защитном веществе твердеющего бетона уплотняющего его структуру сульфата алюминия  $Al_2(SO_4)_3$  с использованием положений (1)–(5), полученных на основе выполненного анализа имеющихся теоретических и экспериментальных (в том числе собственных) данных.

1. Показатель  $m_3 / 1 - m_3$  в формуле (7) есть не что иное, как отношение объема пор к объему твердой фазы в единице их суммарного объема и соответствует понятию *коэффициента пористости цементного теста*  $\epsilon_{цт.}$ ,

детально рассмотренному и установленному в работах И.Н. Ахвердова [4; 10] для широкого диапазона  $K_{н.г.}$  цемента в зависимости от водоцементного отношения цементного теста.

По результатам тестирования имеющихся экспериментальных данных [7 и др.] применительно к рассматриваемому случаю использования сульфата алюминия для массово выпускаемых цементов, которые характеризуются удельной поверхностью  $S_{уд.} \sim 2800 \dots 3300 \text{ см}^2/\text{г}$  ( $0,28 \dots 0,33 \text{ м}^2/\text{г}$ ), усредненный размер зерна (на основании ситового анализа) принят  $d_s \sim 11,5 \text{ мкм}$ , что соответствует аналогичным результатам, полученным в работе [11 и др.].

2. Величина эмпирического коэффициента  $\beta$ ,  $\text{Н}/\text{м}^3$ , введенного в фильтрационную гидравлику Козени для оценки неопределенности процесса, принята с учетом исследований [6] для рассматриваемого случая (цементосодержащих фильтрационных сред) равной 11,4.

3. Расчетное значение избыточного давления  $P_c$ , возникающего за счет сил сорбции (вследствие перераспределения жидкой фазы и развития контракции в объеме цементного теста) и представляющего собой перепад давлений между окружающей средой (атмосферное давление) и давлением разрежения (за счет развивающейся миграции и связывания цементом воды затворения) принято на основе анализа результатов исследований явления контракции, выполненных Б.Г. Скрамтаевым и коллективом его сотрудников, С.В. Шестоперовым, П.А. Ребинером, Т.С. Пауэрсом и другими исследователями при изучении явления контракции, развивающегося в процессе взаимодействия цемента с водой, как в начальный период твердения, так и в проектном (28 сут) и более позднем возрасте [12 и др.].

В процессе исследований [12] определена разница в величине возникающего вакуума (в мм рт. ст.) для твердеющего цементного теста и мелкозернистого цементно-песчаного бетона при значительно меньшей величине для последнего. Одновременно было установлено, что наибольшая интенсивность вакуума наблюдается в первые 1–3 ч (до 2-х сут), которая затем после 3–8 сут затухает по закономерности, приведенной на рисунке 1 для твердеющего цементного камня [12]. При этом уровень разрежения в объеме цементного камня существенен и достигает 140–180 мм ртутного столба (см. рисунок 1).

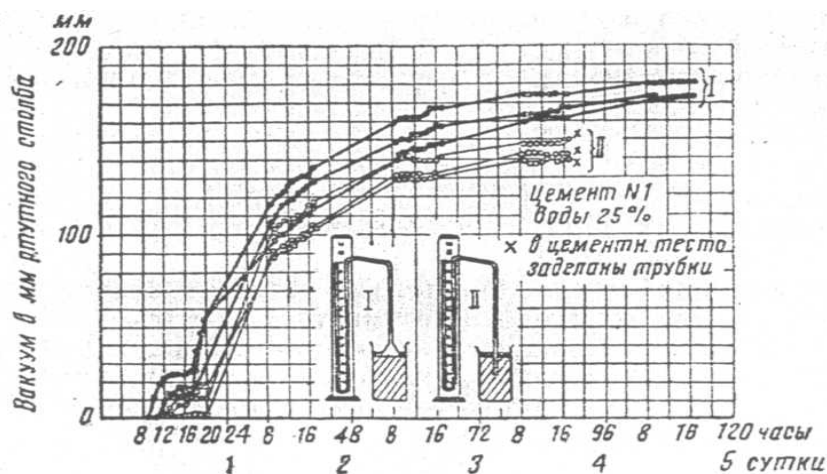


Рисунок 1. – Закономерность (график) развития интенсивности вакуума в твердеющем цементном камне [12]

Для мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора), например, состава Ц:П=1:3 (при В/Ц~0,5), приготовленного на портландцементе, значение вакуума оказалось ниже (очевидно, за счет уменьшения объема цементного теста, образования более пористой зоны контакта заполнитель – цементное тесто и роста проницаемости этой системы в сравнении с системой цемент – вода). Так, в первые 2–6 ч величина вакуума в растворе в среднем составила (3,0–6,0) мм рт. ст., а через 24–48 ч – соответственно 9,0–11,5 мм рт. ст. [4].

Следует отметить, что приведенные выше результаты экспериментов (и аналогичные данные из других работ) получены исследователями на герметично изолированных образцах (объемах) твердеющего цементного камня или раствора (бетона). В реальных строительных конструкциях полной герметизации объема бетона достичь невозможно, за исключением случая применения герметика, наносимого на обрабатываемую поверхность защитного состава вещества, инициирующего образование в верхнем слое цементного камня уплотненной структуры.

4. Из опыта известно, что для расчета периода времени  $\tau$  (6) применительно к рассматриваемому решению задач по уходу за твердеющим бетоном наиболее важны следующие два временных отрезка. Это первые несколько часов ухода за свежеложенным бетоном и 24–48-часовой период, в пределах которого обычно снимают опалубку и появляется необходимость ухода за открывающимися поверхностями строительных конструкций. Оценка точ-

ного расчетного периода времени, учитывающего развитие химических реакций между веществом защитного состава и продуктами гидролиза–гидратации цемента, по существу невозможна, так как этот процесс практически нельзя проконтролировать. Вместе с тем, можно допустить, что процесс фильтрации–диффузии вводимого в бетон вещества будет наиболее интенсивно развиваться в первые 24 ч после обработки защищаемой поверхности. Этот вывод базируется на цитированных и более широко представленных данных в работах [12 и др.], а также на основании авторских экспериментальных данных о толщине видоизмененного (уплотненного) слоя цементного камня [13] в зависимости от продолжительности твердения образцов. В частности, не установлено существенного увеличения толщины уплотняемой структуры верхнего слоя цементного камня, твердевшего в течение 28 сут, по сравнению с его толщиной, замеренной через 24 ч, как в случае ухода за свежесформованным бетоном, так и для распалубленных образцов бетона (цементного камня). На этом основании расчетная величина времени  $\tau$  активного воздействия вещества защитного состава на основе сульфата алюминия принята постоянной и равной 24 ч, или с учетом используемой в формулах (6) и (7) размерности 86 400 с.

Возможная погрешность такого допущения может быть компенсирована (что далее подтверждено совпадением расчетных и опытных значений глубины проникновения раствора в бетон, т.е. изменением толщины уплотненного слоя) за счет введения *поправочного эмпирического коэффициента*  $\beta$ , учитывающего особенности бетонной среды, в которой развивается процесс фильтрации, в частности, отличия в развитии этого процесса для свежеуложенного и частично затвердевшего бетона. В первом случае миграция вводимого вещества облегчена за счет большего объема свободной жидкой фазы в сравнении с условиями, складывающимися при обработке уже частично затвердевшего и структурировавшегося цементного камня в бетоне после снятия опалубки, что отражается в глубине его проникновения и толщине структурно измененного (уплотненного) слоя цементного камня. В последнем случае сужается база для реакций вещества уплотняющей структуру добавки с продуктами гидролиза–гидратации цемента, так как эти реакции за период твердения бетона до снятия опалубки уже частично реализовались. В связи с этим принято, что изменение указанных выше условий фильтрации учитывается величиной поправочного коэффициента  $\beta$  (см. п. 2) при принятом равенстве времени проникновения защитного состава в бетон.

5. Для оценки влияния *величины разрежения и возникающего перепада давления*  $P_c$  по отношению к атмосферному в наружных слоях твердеющего бетона строительных конструкций в рассматриваемом случае использованы данные [12; 14], относящиеся к условиям полной герметизации испытываемых образцов твердеющего раствора. Их анализ показывает значительно меньший рост вакуума во времени, чем у образцов твердеющего цементного камня [12]. Применительно к внешним (особенно неопалубленным, открытым) слоям бетона следует ожидать, что он будет минимальным, так как этот слой граничит с атмосферой. В связи с этим для расчетов принято использовать минимальное из установленных для цементно-песчаного раствора [13] значение степени разрежения через 24 ч твердения:  $\sim 9,0$  мм рт. ст., или в системе СИ  $P_c = 9,0 / 760 \times 1,013 \times 10^5 = 1199,6 \sim 1200$  Па.

Используя величины расчетного эффективного диаметра зерна цемента  $d_s \sim 11,5 \cdot 10^{-6}$ , м, давления вакуума  $P_c$ , Па ( $\text{Н/м}^2$ ), удельного веса используемого раствора  $\rho_{ж}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , вязкости  $\mu_d$ ,  $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ , коэффициента пористости цементного теста  $\epsilon_{ц.т.} = m_3 / (1 - m_3)$ , доли ед., поправочного коэффициента  $\beta$ ,  $\text{Н/м}^3$ , обоснованные для рассматриваемого случая в положениях п. 1–5, применяя выражение (7), получим в общем виде следующую зависимость для инженерных расчетов:

$$l = 11,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \epsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_d}}, \text{ мм.} \quad (8)$$

При минимальном значении давления  $P_c \sim 1200$  Па для случаев: *a* – обработки свежесформованного бетона с поправочным коэффициентом  $\beta_{св}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , *б* – ухода за бетоном после снятия с него опалубки (бортоснастки) с поправочным коэффициентом  $\beta_{оп}$ ,  $\text{Н/м}^3$ , и  $\tau = 86\,400$  с (24 ч), зависимость (8) преобразуется для указанных состояний соответственно в вид (9) и (10):

$$l_{св} = 117 \sqrt{\beta_{св}} \cdot \epsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0}, \text{ мм;} \quad (9)$$

$$l_{оп} = 117 \sqrt{\beta_{оп}} \cdot \epsilon_{ц.т.} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0}, \text{ мм.} \quad (10)$$

Входящий в формулы (9) и (10) коэффициент  $\beta$ ,  $\text{Н/м}^3$ , характеризует особенности фильтрационной среды рассматриваемого частного варианта фильтрации при использовании уплотняющей добавки  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . К ним относятся низкое давление, инициирующее процесс массопереноса защитного раствора, и влияние химического взаимодействия вводимого вещества с продуктами гидролиза–гидратации цемента.

Исходя из анализа накопленных экспериментальных данных при тестировании формул (9) и (10), установлено, что для свежесформованного бетона коэффициент  $\beta_{св}^{1/2} \sim 2,42 \cdot 10^{-2}$ , а для бетона после снятия опалубки  $\beta_{оп}^{1/2} \sim 1,36 \cdot 10^{-2}$ . Подставляя указанные значения коэффициента  $\beta$  в формулы (9) и (10) для растворов с известными  $\rho_{ж}$  и  $\mu_g$  соответственно, окончательно получим

$$l_{\text{св}} = 2,83 \cdot \varepsilon_{\text{ц.т.}} \cdot \sqrt{1/\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_0}, \text{ мм}, \quad (11)$$

$$l_{\text{оп}} = 1,59 \cdot \varepsilon_{\text{ц.т.}} \cdot \sqrt{1/\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_0}, \text{ м}. \quad (12)$$

Из зависимостей (11) и (12) следует, что глубина проникновения защитного раствора с уплотняющей добавкой  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  внутрь объема цементного теста в бетоне пропорциональна коэффициенту пористости и обратно пропорциональна плотности и динамической вязкости раствора-фильтрата. Это соответствует физико-химической сути явления массопереноса, подтвержденной опытными данными.

В практических инженерных расчетах величины  $l_{\text{св}}$  и  $l_{\text{оп}}$  в зависимостях (11) и (12) для конкретных составов, расчетное значение коэффициента “пористости” цементного теста  $\varepsilon_{\text{ц.т.}}$  тяжелого бетона на заполнителях из плотных горных пород допускается принимать по скорректированной профессором И.Н. Ахвердовым таблице 1 [16, с. 126].

Таблица 1. – Значения коэффициента пористости  $\varepsilon_{\text{ц.т.}}$  в зависимости от  $K_{\text{н.г.}}$  цемента и В/Ц [16]

Значения $K_{\text{н.г.}}$ цемента, доли ед.	Параметры	Значения $\varepsilon_{\text{ц.т.}}$ , доли ед., в зависимости от $K_{\text{н.г.}}$ цемента и В/Ц цементного теста									
		В/Ц	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	В/Ц	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	В/Ц	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	В/Ц	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	В/Ц	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$
0,24	В/Ц	0,240	0,264	0,288	0,312	0,336	0,360	0,384	0,400		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,470	0,535	0,600	0,660	0,734	0,800	0,864	0,900		
0,25	В/Ц	0,250	0,275	0,300	0,355	0,350	0,375	0,400	0,412		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,475	0,542	0,610	0,683	0,745	0,808	0,876	0,975		
0,26	В/Ц	0,260	0,286	0,312	0,338	0,364	0,390	0,416	0,430		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,486	0,557	0,625	0,695	0,763	0,831	0,895	0,934		
0,27	В/Ц	0,270	0,297	0,324	0,351	0,378	0,405	0,432	0,446		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,504	0,570	0,645	0,720	0,785	0,855	0,900	0,970		
0,28	В/Ц	0,280	0,308	0,336	0,364	0,392	0,420	0,448	0,462		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,514	0,585	0,660	0,732	0,805	0,875	0,945	0,985		
0,29	В/Ц	0,290	0,319	0,348	0,377	0,406	0,435	0,464	0,480		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,520	0,593	0,665	0,740	0,815	0,886	0,960	1,000		
0,30	В/Ц	0,300	0,330	0,360	0,390	0,420	0,450	0,480	0,500		
	$\varepsilon_{\text{ц.т.}}$	0,524	0,602	0,677	0,750	0,823	0,892	0,970	1,020		

### 3. Экспериментальная проверка достоверности полученных теоретических (расчетных) зависимостей

Оценка соответствия теоретических (расчетных) данных о глубине проникновения в бетон защитного вещества на основе сульфата алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , уплотняющего структуру его верхнего слоя, производилась экспериментально в процессе всего периода исследований на опытных образцах как в лабораторных, так и производственных условиях.

**Методика исследований.** При моделировании процесса ухода за свежетоформованным бетоном уплотняющие его структуру вещества на поверхности изготовленных образцов наносились распылением сжатым воздухом сразу после формования и заглаживания поверхности.

При моделировании процессов ухода за бетоном после снятия опалубки (т.е. после распалубки образцов) защитный состав наносился на поверхности образцов, до этого находившихся в контакте с металлом форм, через 12 и 24 ч от момента их изготовления, что соответствует наиболее реальным срокам распалубки монолитных конструкций в производственных условиях их изготовления.

Оценка глубины проникновения вещества защитного состава в начальный период после нанесения (особенно свежетоформованного цементного теста, а в последующих экспериментах – раствора и бетона) оказалась практически невозможной, включая попытку окрашивать бесцветные растворы испытуемых защитных составов. В этой связи оценка глубины проникновения в цементный камень вещества предлагаемого защитного состава осуществлялась через 24 ч после нанесения, а затем через 3, 7 и 28 сут с помощью трубы-микрометра с ценой деления 0,5 мкм. Для оцвечивания добавки  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (точнее – иона  $\text{Al}^{+3}$ , через 1 сут твердения) использовался раствор

вещества «Ализарин», который наносился на поверхность образца перед замером. После 3, 7 и 28 сут твердения оценивалась толщина слоя с уплотненной структурой, имеющего более темный цвет.

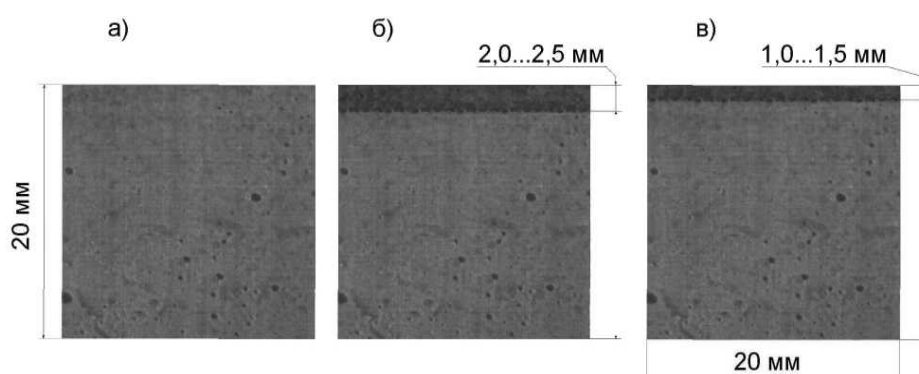
Во всех случаях защитный состав для повышения надежности измерений наносился на обрабатываемую поверхность дважды. При этом второе нанесение состава осуществлялось после высыхания обрабатываемой поверхности (матовая поверхность без блеска пленки жидкости на ней). Для свежееотформованного бетона повторное нанесение осуществлялось через ~ 20...30 мин, а для распалубленного – через ~ 10...15 мин.

В качестве защитного состава для каждой серии экспериментов использовался 5%-й водный раствор  $Al_2(SO_4)_3$  при температуре 20 °С, обладающий при данной концентрации сульфата алюминия общеизвестными справочными свойствами по плотности и динамической вязкости:  $\rho_{ж} \sim 1051 \text{ Н/м}^3$ ;  $\mu_{д} \sim 0,001416 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ . Температура обрабатываемых образцов каждой серии соответствовала ~ 20 °С ( $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2. – Сопоставление расчетной и экспериментальной толщины измененного слоя цементного камня

Способ обработки поверхности, расчетная формула	Расчетная толщина слоя, мм	Экспериментальные данные о толщине* слоя цементного камня, (мм) через период времени, сут			
		1	3	7	28
По свежееотформованной, формула (11)	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, формула (12)	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**

Примечания. \*Среднее значение по двум минимальным и двум максимальным замерам толщины слоя с округлением до 1 мкм; \*\*среднее значение толщины слоя по 6 образцам с округлением до 1 мкм.



**а** – образец без обработки;  
**б** – то же, с обработкой по свежееотформованному цементному тесту;  
**в** – то же, с обработкой после распалубки.

Рисунок 2 – Общий вид и результаты испытаний одной из серий образцов цементного камня:

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований подтверждает достоверность предложенных инженерно-теоретических зависимостей (11) и (12) для оценки вероятной глубины проникновения

в цементный камень бетона вещества защитного состава на основе 5%-го водного раствора  $Al_2(SO_4)_3$  и толщины формирующегося слоя цементного камня с уплотненной и менее проницаемой структурой. Отклонение между рассчитанными по (11) и (12) и экспериментальными данными находится в пределах 9%. Подтверждена правомерность сделанного при выводе формул (11) и (12) допущения по расчетному времени  $\tau_{расч.} \sim 24$  ч.

Установлено, что максимальная глубина проникновения в бетон вещества защитного состава достигается за первые 24 ч после его обработки, после чего она увеличивается незначительно и полностью прекращается к 28 сут твердения цементного камня. Так, при обработке свежееотформованного цементного теста эта разница по средним значениям 6 образцов составила  $(2,375 - 2,245) : 2,245 \times 100 \sim 5,8\%$ , при обработке распалубленной через 24 ч поверхности цементного камня –  $(1,362 - 1,258) : 1,258 \times 100 \sim 8,3\%$ . Наибольшее отклонение значений экспериментальных данных от рассчитанных по (11) и (12) к 28 сут твердения составило для свежееотформованного цементного теста  $(2,398 - 2,25) : 2,25 \times 100 \sim 7\%$ , для обработанного после распалубки –  $(1,385 - 1,26) : 1,26 \times 100 \sim 9\%$ . В целом это позволяет считать возможным использование зависимостей (11) и (12) для практических оценочных расчетов.

Данный вывод подтверждают фотографии одной из серий образцов цементного камня 28-суточного возраста, представленные на рисунке 2. На этих образцах виден более темный слой со стороны обработки их защитным составом (в данном конкретном случае – 5%-м раствором  $Al_2(SO_4)_3$ ). Экспериментально установленная глубина проникновения вещества уплотняющей структуру цементного камня добавки по варианту обработки свежееотформованного материала составляет 2,0...2,5 мм, а по варианту для распалубленных поверхностей – 1,0...1,5 мм и практически близка к стабилизации через 24 ч после обработки и существенно не увеличивалась к 28 сут и в более поздние сроки. Исследования проведены на образцах в возрасте до 180...360 сут.

### Заключение

1. Предложены инженерно-теоретические зависимости (11) и (12) для инженерных расчетов глубины проникновения защитного раствора в твердеющий бетон, полученные на основе результатов экспериментального определения значений поправочного эмпирического коэффициента  $\beta$  для случая ухода за свежееотформованным бетоном ( $\beta_{св} \sim 2,42 \times 10^{-2}$ , Н/м<sup>3</sup>) и после распалубки изделий (конструкций) –  $\beta_{от} \sim 1,36 \times 10^{-2}$ , Н/м<sup>3</sup>.

2. Экспериментально подтверждена достоверность расчетов по предложенным зависимостям (11) и (12) и возможность их практического использования для оценки глубины проникновения вещества защитного состава (на примере 5%-го раствора  $Al_2(SO_4)_3$ ) как при обработке свежееотформованного бетона, так и в случае обработки поверхности бетона после распалубки. Отклонение между рассчитанными по (11) и (12) и экспериментально установленными значениями составляет не более 9%, т.е. обеспечивается достаточная для оценочных расчетов точность.

3. Аналитические зависимости (11) и (12) дают возможность оценить взаимосвязь времени и глубины проникновения фильтрата в твердеющий бетон и обеспечить разработку режимов ухода за бетоном, рассчитать время и глубину проникновения фильтрата в твердеющий бетон, периодичность нанесения защитных растворов на поверхность возводимых конструкций в зависимости от его свойств (вязкости, плотности), характеристик фильтрационной среды (пористости, дисперсности (крупности) частиц), условий твердения и используемых добавок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Защитный состав для ухода за твердеющим бетоном : пат. ВУ N19821 С1 / Э.И. Батяновский, С.М. Эгбалник. – Оpubл. 28.02.2016.
2. Стольников, В.В. Исследования по гидротехническому бетону / В.В. Стольников. – М. : Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
3. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементного бетона / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М. : Стройиздат, 1979. – 344 с.
4. Ахвердов, И.Н. Влияние водоцементного отношения на формирование структуры цементного камня и недостатки формул прочности бетона / И.Н. Ахвердов // Строительная промышленность, –1953. –N 8. – С. 44–47.
5. Стольников, В.В. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на образование структуры бетона и на его водонепроницаемость / В.В. Стольников, П.А. Ребиндер, Е.В. Лавринович // ДАН СССР. – 1951. – Вып. XXXI, № 3. – С. 431–434.
6. Батяновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формования / Э.И. Батяновский. – Минск : НП ООО «Стринко», 2002. – С. 108–112.
7. Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л.С. Лейбензон. – М. : Гостехиздат, 1947. – С. 11–73.
8. Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз. – М. : Мир, 1964. – С. 68–104.
9. Батяновский, Э.И. Монолитный бетон сухого формования / Э.И. Батяновский, В.Ю. Мирончик. – Минск : НПООО «Стринко», 2003. – 175 с.
10. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон / И.Н. Ахвердов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 106 с.



11. Блещик, Н.Н. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона / Н.Н. Блещик. – Минск : Наука и техника, 1977. – 230 с.
12. Скрамтаев, Б.Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи / Б.Г. Скрамтаев // Труды IV Всесоюзной конф. по бетону и железобетонным конструкциям. – М. – Л. : Гос. изд-во строит. лит., 1949. – Ч. III : Усовершенствование технологии бетона. – С. 3.
13. Эгбалник, С.М. Технология и эффективность защиты твердеющего бетона веществом сульфатоалюмината / С.М. Эгбалник // Строительная наука и техника. – 2013. – № 1 (42). – С. 14–21.
14. Шестоперов, С.В. Долговечность бетона / С.В. Шестоперов. – М. : Автотранспорт, 1955. – 480 с.
15. Трахимчик, О.Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 ; 05.17.01 / О.Е. Трахимчик ; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2006. – 19 с.
16. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.

Поступила 02.06.2021

## THEORETICAL ESTIMATION OF PENETRATION DEPTH OF PRIMARY PROTECTION SUBSTANCE INTO HARDENING CONCRETE BY USING ALUMINIUM SULFATE CONDENSING ITS STRUCTURE

S. EGBALNIK

*Results of theoretical researches of primary protection of hardening concrete with solutions on a basis of non scarce and inexpensive additive of aluminium sulphate ( $Al_2(SO_4)_3$ ) which is standardized and resolved to application for concrete products are given in this article. Developed mathematical dependences of the depth of penetration into the concrete of the offered protective solutions, theories of the filtrational hydraulics based on fundamental laws and physical and chemical phenomena occurring in the hardening cement stone caused by the process of depression causing absorption of the protective solution put on its surface are resulted. In the received dependences factors of: pressure –  $P_c$ ,  $N/m^2$  (Pas), caused by the depression arising in volume of concrete; influence time –  $\tau$ , sec; properties of the put solution (filtrate) and its dynamic viscosity –  $\mu_0$ ,  $N\cdot sec/m^2$ ; density –  $\rho_{ж}$ ,  $N/m^3$ ; characteristics of porosity of the filtrational environment (factor of porosity of the cement test –  $\varepsilon_{ц.т.}$ , unit shares and correction factor of physical uncertainty of the specified properties –  $\beta$ ,  $N/m^3$  are coordinated among themselves. Dependences allow to calculate (estimate) the depth of penetration ( $l$ , mm) of the substance of protective solution into porous of the filtrational environment of protected concrete. On the basis of the experimentally-theoretical approbation of the offered dependences they are approximated for use in engineering calculations by means of introduction of the correction factor  $\beta$ , equal: for a care case of a freshly formed concrete –  $\beta_{ce} \sim 2,42 \times 10^{-2}$ ,  $N/m^3$  and for products (designs) after timbering removal –  $\beta_{om} \sim 1,36 \times 10^{-2}$ ,  $N/m^3$ . The reliability of the offered settlement dependences for estimation of the depth of penetration of protective substance (for example of 5% solution of  $Al_2(SO_4)_3$ ) both at processing of a freshly formed concrete and in case of processing of a surface of concrete after timbering removal is experimentally confirmed. The deviation between theoretical settlement and experimental data makes no more than 9 % that provides sufficient accuracy for estimated calculations of the offered analytical dependences with demanded probability factor of 5% ( $\alpha = 0,95$ ).*

**Keywords:** primary protection of hardening concrete, cement stone, protective substance with addition of aluminium sulphate, filtrational theory of hydraulics, engineering-theoretical dependences, reliability, effects of diffusion, counteraction, depression.