

Саназ Мохаммад ЭГБАЛНИК,  
аспирант кафедры  
"Технология бетона  
и строительные материалы"  
Белорусского национального  
технического университета

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,  
доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
"Технология бетона  
и строительные материалы"  
Белорусского национального  
технического университета

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИОННО-ДИФфуЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА

## THEORETICAL BASIS OF FILTRATION-DIFFUSION PROTECTION OF THE SURFACE OF HARDENING CONCRETE

*В статье на основе фундаментальных представлений теории фильтрации жидкостей в пористой среде обосновывается возможность моделирования процесса "пропитки" поверхности твердеющего бетона составами, защищающими его от испарения воды.*

*In this article, the possibility of modeling the process of "impregnation" of the surface of hardening concrete with agents, protecting it from water evaporation, has been substantiated on the basis of the fundamental concepts of the theory of filtration of liquids in porous media.*

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс твердения цементного бетона, приготовленного из пластичной бетонной смеси (что характерно для монолитного строительства и большинства технологий производства сборного железобетона), сопровождается постепенным переходом (трансформацией) цементного теста из пластичного в твердофазное состояние цементного камня в затвердевшем бетоне. Этот процесс сопровождается постоянным перераспределением жидкой фазы в объеме бетона, а в бетоне на заполнителях из плотных горных пород (являющемся предметом настоящих исследований) — воды затвердения в объеме цементного теста, трансформирующегося в цементный камень. На начальной стадии взаимодействия цемента с водой (при условии качественной укладки и уплотнения бетона, сведения к минимуму связанных с этим и с воздухововлечением дефектов структуры) жидкость образует пространственную систему, заполняющую объем межзерновой пустотности частиц (флокул) цемента и включающую сольватные оболочки частиц твердой фазы (цемента, заполнителей, пылевидных фракций, поступивших в бетон вместе с ними).

Развитие гидролизно-гидратационного процесса взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой, начинающегося с момента их взаимного контакта, сопровождается физико-химическим связыванием жидкости. Не вникая в сущность происходящих при этом химических реакций, следует отметить, что в этой реагирующей системе постоянно уменьшается количество свободной жидкой фазы, а занимаемый ею первоначальный объем постепенно заполняется продуктами гидратации цемента. 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 [1–5], а в реагирующей системе "цемент — вода" возникает явление "внутреннего" вакуума.

Существенную роль в развитии этого явления, по мнению авторов, могут играть объемы воды, адсорбирующейся на поверхности зерен заполнителей. Ведь в бетоне на плотных заполнителях удерживается в начальный период до 40–50 л воды [6, 7]. Отличительной особенностью процесса заполнения продуктами гидратации цемента занимаемых ими объемов является его одностороннее развитие, то есть со стороны цементных зерен (флокул), контактирующих с поверхностью заполнителя через прослойки жидкости. В исследованиях, относящихся к оценке структурно-морфологических особенностей контактных слоев цементного камня у поверхности зерен заполнителей [8–11], отмечается общая тенденция снижения плотности цементного камня контактной зоны в сравнении с его "глубинными" объемами. При этом отмечается неравномерность пористости по "глубине" контактного слоя — с ее ростом непосредственно у поверхности заполнителя. Здесь же установлено повышенное содержание в продуктах гидратации цемента наибольших по размерам и одновременно наименее прочных среди гидрокристаллов соединений портландита. Оценка пористости контактного слоя на глубину ~50 мкм показала, что у поверхности заполнителя она в 2 раза превышает величину пористости, чем на 30-микрометровом удалении от нее [8].

Изложенное свидетельствует о том, что процесс взаимодействия цемента с водой в объемах зоны контакта с заполнителем протекает в условиях, характеризующихся более высоким водоцементным отношением чем в объеме цементного камня. Можно ожидать, что и эффект диффузии уплотняющих структуру бетона веществ за этот счет будет проявляться и поддерживаться более длительный период времени благодаря наличию свободной жидкости.

Для разрабатываемой технологии защиты твердеющего бетона (ухода за ним) эти аспекты важны, так как ее эффективность непосредственно зависит от глубины проникновения (диффузии) молекул используемых веществ в бетон. Путем, по которому они способны диффундировать вглубь, является вода, а ускорить процесс

позволяет наличие разрежения в объеме твердеющего бетона. Следует ожидать, что водорастворимые вещества уплотняющих структуру бетона добавок, проникая вглубь по объемам "свободной" (не связанной) воды в свежееотформованном бетоне, будут вступать в обменные реакции (или реакции присоединения) с продуктами гидролиза клинкерных минералов цемента, в результате которых возрастут темп формирования и плотность формирующейся структуры цементного камня на некоторую глубину слоя защищаемого бетона. В связи с этим, усложнятся условия миграции жидкой фазы из объема бетона к поверхности испарения. Кроме того, такая уплотняющая структуру бетона добавка, как сульфат алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ , обладает эффектом ускорения схватывания цемента и, в некоторой мере, ускорением твердения бетона. Последний эффект может быть усилен введением в защитный состав родственного сульфату алюминия вещества — сульфата натрия  $Na_2SO_4$ . В результате может быть интенсифицирован рост прочности и плотности обрабатываемого слоя бетона.

Несколько иной механизм взаимодействия представляет собой вариант обработки бетона уплотняющим его структуру веществом — гексафторсиликатом магния  $MgSiO_2F_6$ . По данным автора разработки [12], это вещество обеспечивает эффект уплотнения за счет реакции с гидроксидом кальция с образованием соединений значительно большего объема, чем вступившие в реакцию вещества. Производственная апробация состава при обработке затвердевшего бетона подтвердила эффективность данной разработки [12], что явилось основанием для экспериментальной проверки возможности ее использования в качестве защитного состава по свежееотформованному твердеющему бетону в исследованиях авторов статьи.

Физико-химические предпосылки для использования гидрофобизирующих добавок (веществ) в качестве защитных составов свежееотформованного твердеющего бетона взаимосвязаны как с их использованием в качестве добавок в бетон с целью снижения его водопоглощения и роста водонепроницаемости (СНВ, СДО, ГКЖ и др.), так и в варианте гидрофобизаторов по затвердевшему бетону (ГКЖ). Обработка наружного слоя бетона этими веществами, характеризующимися водоотталкивающим эффектом, может создать препятствие для миграции воды к испаряющей поверхности за счет их присутствия во внешнем слое бетона.

Следует отметить, что процесс диффузии (проникновения) вещества различных добавок (составов) определяется как способностью бетона (фильтрационной среды) сорбировать их (за счет наличия свободной воды, явления вакуума и капиллярного подсоса по мере становления структуры и формирования капиллярной пористости), так и свойств водных растворов (эмульсий, дисперсий), характеризующих свойства фильтрата (вязкость, плотность, способность растворяться в воде, зависимость этих характеристик от температуры).

#### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ДОБАВОК**

*Физико-химические основы* разрабатываемой технологии первичной защиты бетона базируются на физических явлениях массо- или влагопереноса, сопровож-

дающих начальный период твердения цементного бетона, и химическом взаимодействии наносимых на защищаемую поверхность веществ с продуктами гидролиза и гидратации клинкерных минералов цемента, в результате которого образуются новые соединения, уплотняющие структуру камня на некоторую глубину. В результате будут сужаться или кольматироваться (закупориваться) каналы движения жидкости [12–17], снизится или будет предотвращено испарение воды затворения, обеспечатся условия, благоприятные для твердения цемента и соответственно для формирования более плотной и непроницаемой структуры цементного камня и бетона в целом.

Свежееотформованный бетон представляет собой систему, проницаемость которой для химических реагентов связана с наличием объема воды затворения и в частности той ее части, которая образует пленку на поверхности пластичного бетона в первоначальный период после его укладки. Данное явление связано как с избыточным количеством жидкости по условиям формирования, так и с развитием контракционно-седиментационных эффектов во времени [1, 6, 7, 18, 19]. Как было отмечено во введении, контракционные явления сопровождаются проявлением разрежения в объеме бетона. Кроме того, процесс формирования структуры цементного камня в твердеющем бетоне приводит к появлению системы сообщающихся пор, обладающих способностью сорбировать (капиллярный подсос) контактирующую с поверхностью бетона жидкость.

Все это в целом создает необходимые и достаточные условия для реализации приема защиты твердеющего бетона путем нанесения соответствующих химических реагентов в виде водных растворов (эмульсий) на открытые поверхности конструкций. Проникновение их вещества в объем формирующейся структуры внешнего слоя цементного камня (бетона), по мнению авторов, связано как с диффузией ионов (молекул) растворенных в воде веществ, так и с массопереносом раствора в пористой среде, которую представляет собой цементное тесто, трансформирующееся в цементный камень. Поэтому количественная оценка глубины и времени пропитки могут быть определены с учетом фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [20–25], а на этом основании обеспечивается разработка режимов ухода за бетоном: время нанесения защитных составов, расход вещества, периодичность нанесения в зависимости от условий твердения и др.

*Теоретические основы процесса фильтрации жидкости* в пористых средах были заложены в начале XIX века работами Пуазейля, Хагена и развиты Дарси, получившим формулу, выражающую "линейный закон Дарси" и используемую в современной фильтрационной гидравлике

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

где  $V_{\phi}$  — скорость фильтрации жидкости или газа;  
 $K_{\phi}$  — коэффициент проницаемости среды (коэффициент фильтрации);  
 $\rho_{*}$  — плотность жидкости или газа;  
 $dP$  — перепад давления на длине участка фильтрационной среды ( $L$ ) или его высоте ( $H$ ).

Закон Дарси описывает процессы фильтрации жидкости в ламинарном режиме, то есть интерпретируются линейные характеристики этого процесса при сравнительно небольших скоростях потока. Коэффициент фильтрации  $K_\phi$  представляет собой скорость фильтрации при гидравлическом уклоне, равном 1. То есть, когда имеется потеря единицы давления на единицу длины,  $K_\phi$  имеет размерность скорости (м/с) и зависит от свойств фильтрационной среды и фильтрующей жидкости.

В работах [26, 27] фундаментальные представления теории фильтрации жидкостей были привлечены для получения зависимости, с помощью которой можно рассчитать время или глубину пропитки сухих бетонных смесей (как пористой среды) при насыщении их водой, водными растворами химических добавок и водяным паром. Для расчетов применена формула коэффициента фильтрации

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

где  $\beta$  — размерный эмпирический коэффициент, Н/м<sup>3</sup>, принимаемый для фильтрации воды в зернистой среде (песок) по Козени равным 8,2, а по данным [26] для цементосодержащих бетонных смесей  $\beta \sim 11,4$ ;

$d_3$  — 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 ед.

Следует отметить, что в формуле Козени приведена истинная пористость фильтрационной среды  $m$  в сухом состоянии твердой фазы. Академик Лейбензон [20] обосновал необходимость учета ее уменьшения до некоторого значения  $m_3$  (эффективная пористость фильтрационной среды) за счет адсорбционных слоев жидкости, остающихся неподвижными в процессе ее фильтрации, и "застойных" областей (или объемов) высоковязких жидкостей (например, нефти), располагающихся с обратной стороны (по ходу движения жидкости) частиц твердой фазы, слагающих фильтрационную среду.

С учетом того обстоятельства, что в бетонной смеси и соответственно в свежееположенном бетоне цементное тесто представляет собой систему мицелл, то есть частиц (флокул) цемента в водных сольватных оболочках (а в бетоне — и зерна заполнителей "укутаны" адсорбированной на них пленкой жидкости), для рассматриваемого авторами случая в дальнейшем будет использован подход Лейбензона к оценке пористости фильтрационной среды как эффективной.

Подставив значения коэффициента фильтрации (2) в формулу (1), получим выражение для скорости фильтрации

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

где  $\beta$ ,  $d_3$ ,  $\mu_d$ ,  $m_3$  — то же, что в формуле (2);  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Из теории фильтрации [20] известна зависимость между пористостью среды  $m$ , скоростью фильтрации  $v$  и средней скоростью движения жидкости в порах  $\omega$

$$\omega = \frac{v_\phi}{m}. \quad (4)$$

Подставив выражение скорости фильтрации (3) в зависимость (4), получим скорость движения жидкости в порах  $\omega$

$$\omega_\phi = \beta \cdot \frac{d_3^2}{\rho_{ж} \cdot \mu_d} \cdot \frac{m_3^3}{(1 - m_3)^2} \cdot \frac{dP}{dl}. \quad (5)$$

Учтем, что для фильтрации жидкости без избыточного давления, как это имеет место при сорбции твердеющим цементом раствора реагентов в виде уплотняющих структуру добавок, градиент  $dP/dl$  будет зависеть от эффекта контракции и возникающего при этом разрежения в объеме цементного теста в бетоне. В общем случае обозначим его  $P_c$  (давление, создаваемое силами сорбции). Тогда зависимость (5) может быть записана в виде:

$$\omega_\phi = \beta \cdot \frac{P_c \cdot d_3^2}{\rho_{ж} \cdot \mu_d \cdot l} \left[ \frac{m_3}{1 - m_3} \right]^2. \quad (6)$$

Примем условие, при котором раствор реагента, нанесенный на поверхность бетона, при средней скорости движения в порах  $\omega$  будет проникать на глубину  $l$  (м) за время  $\tau$  (с), то есть  $\tau = l/\omega$ . Тогда, подставив выражение (6) в эту зависимость вместо  $\omega$  и выразив плотность жидкости (раствора)  $\rho_{ж}$  через силу тяжести, то есть в размерности Н/м<sup>3</sup>, получим:

$$\tau = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot \mu_d \cdot l^2}{P_c \cdot d_3^2} \cdot \left( \frac{1 - m_3}{m_3} \right)^2, \quad (7)$$

$$l = \frac{m_3 \cdot d_3}{1 - m_3} \cdot \sqrt{\frac{\beta P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_d}}. \quad (8)$$

Полученные формулы учитывают взаимосвязь времени и глубины проникновения фильтрата в зависимости от его свойств (вязкости и плотности) и характеристик фильтрационной среды (пористости и дисперсности (крупности) ее частиц) и могут быть основой для оценки процесса фильтрационного массопереноса при обработке поверхности бетона растворами уплотняющих его структуру химических добавок после их упрочнения. В частности, отношение  $(m_3/(1 - m_3))$  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 [7, 28] для широкого диапазона  $K_{цт}$  цемента в зависимости от водоцементного отношения цементного теста.

Для практического использования формул (7) и (8) значение эффективного (усредненного) размера (диаметра) цементных частиц (флокул) на основании данных работ [26, 29–31] может быть приведено к некоторому фиксированному среднему расчетному значению. Так, по данным [29] с учетом коэффициента шероховатости поверхности зерен цемента  $K_{ш}$  для известной удельной поверхности шарообразных частиц ( $S_{уд,расч} = 6/(d_3 \cdot \rho_{ц})$ , см<sup>2</sup>/г) эффективный диаметр  $d_3$  (м) этих частиц можно рассчитать по формуле

$$d_3 = \frac{0,006 K_{\text{ш}}}{S_{\text{уд.расч}} \cdot \rho_{\text{ц}}}, \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{ц}}$  — плотность цемента, кг/м<sup>3</sup>.

Оценка формулы (9) в работе [26] по известным (установленным экспериментально) данным о фракционном составе цемента и его удельной поверхности (по прибору ПСХ) позволила установить величину коэффициента  $K_{\text{ш}} = 1,75$ , что подтвердило аналогичные данные, приведенные в исследованиях [29], где  $K_{\text{ш}} \approx 1,76$ , а для массово выпускаемых цементов, которые характеризуются удельной поверхностью  $S_{\text{уд}} \sim (2800-3300) \text{ см}^2/\text{г}$ , усредненный диаметр зерна (на основании ситового анализа) составил  $d_3 \sim 11,5 \text{ мкм}$ , что практически совпадает с оценкой, данной в работах [30, 31]. Величина эмпирического коэффициента  $\beta$  (размерность — Н/м<sup>3</sup>), введенного в фильтрационную гидравлику Козени для учета влияния дополнительных факторов, определена в исследованиях [26] экспериментально-расчетным методом (при знании всех остальных величин) по формулам (7) и (8) и для цементосодержащих фильтрационных сред равна  $\beta \sim 11,4$ .

Расчетное значение избыточного давления  $P_c$ , возникающего за счет сил сорбции (вследствие 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), может быть принято (фиксированным для упрощения расчетов) на основании данных исследований, выполненных в 30–60 гг. XX века Б. Г. Скрамтаевым с соавторами, С. В. Шестоперовым с соавторами, П. А. Ребинером с соавторами, Т. С. Пауэрсом и другими исследователями при изучении явления контракции, развивающемся в процессе взаимодействия цемента с водой как в начальный период твердения, так и в проектном (28 суток) и более позднем возрасте. Ими была установлена разница в величине возникающего вакуума (в мм рт. ст.) между твердеющим цементным тестом и мелкозернистым цементно-песчаным бетоном, при значительно меньшей величине для последнего [32, 33]. Одновременно было установлено, что развитие вакуума наиболее интенсивно идет в первые 1–3 ч, затем замедляется и снова возрастает по закономерности, приведенной на рис. 1 для твердеющего цементного камня [32]. Очевидно, что в целом этот процесс наиболее интенсивно развивается в первые 2 суток и после 3-х суток затухает. При этом уровень разрежения в объеме цементного камня существенен и достигает 140–180 мм рт. ст.

В случае наблюдений за мелкозернистым бетоном (цементно-песчаным раствором), например, для состава Ц:П = 1:3 (при  $\mu_{\text{д}} = 0,5$ ), приготовленном на портландцементе, значение вакуума оказалось ниже (очевидно, как за счет снижения объема цементного теста, так и за счет появившейся 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. [33]. Применительно к решению рассматриваемых в нашем случае задач по уходу за твердеющим бетоном наиболее значимы два временных от-

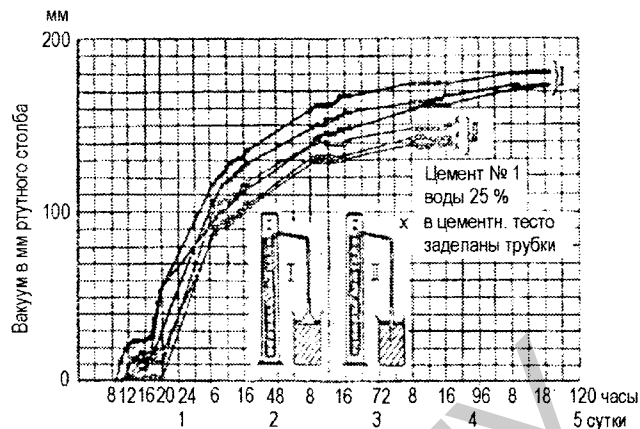


Рис. 1. Явление вакуума в твердеющем цементном камне (по данным [32])

Таблица 1. Расчетные значения  $P_c$

Время после укладки бетона, ч	Расчетные значения $P_c$	
	в мм рт. ст.	в Па (Н/м <sup>2</sup> )
Менее 2	3,0	400 (399,9)
3	3,75	500 (499,8)
4	4,5	600 (599,8)
5	5,25	700 (699,8)
6	6,0	800 (799,7)
24	9,0	1200 (1199,6)
48	11,5	1533 (1532,8)

Примечания:  
 1. Расчетная формула:  $(P:760) \times 1,013 \cdot 10^5$ , Н/м<sup>2</sup>.  
 2. Промежуточные значения при необходимости определяют интерполяцией.

резка: первые несколько часов ухода за свежееуложенным бетоном, а также 24–48-часовой период, в пределах которого обычно снимают опалубку и появляется необходимость ухода за открывающимися поверхностями строительных конструкций.

С учетом того, что слои тяжелого бетона внешнего контура конструкций и особенно верхней (неопалубленной) его части на некоторую глубину есть не что иное, как растворная составляющая бетона, воспользуемся данными [33] для оценки величины возникающего в этих слоях разрежения. Переведем их значение в размерность системы СИ, получим приведенные в таблице 1 данные о расчетной величине давления  $P_c$ , Па, для ухода за свежееотформованным бетоном ( $\tau \sim (2-6) \text{ ч}$ ) и после снятия опалубки ( $\tau \sim (24-48) \text{ ч}$ ).

На основании приведенных данных, приняв (с достаточной для практических расчетов точностью) величины  $\beta \sim 11,4 \text{ (Н/м}^3\text{)}$  и  $d_3 \sim 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}$ , введя величину давления вакуума  $P_c$  (Па или Н/м<sup>2</sup>), плотность используемого раствора  $\rho_{\text{ж}}$  (Н/м<sup>3</sup>) и его вязкость  $\mu_{\text{д}}$  (Н·с/м<sup>2</sup>), а также коэффициент пористости цементного теста  $\varepsilon_{\text{цт}} = m_3 / (1 - m_3)$  (доли ед.), формула (8) для  $l$  (мм) приобретает вид:

$$l = 0,0388 \varepsilon_{\text{цт}} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{д}}}}. \quad (10)$$

В случае ухода за свежееотформованным бетоном с помощью уплотняющих структур веществ (растворы, характеризующиеся известными  $\rho_{\text{ж}}$  и  $\mu_{\text{д}}$ ) в пределах первых  $\tau = 2 \text{ ч}$  или при снятии опалубки через  $\tau = 24 \text{ ч}$  твердения формула (10) упрощается до вида формул (11) и (12):

Таблица 2. Значения коэффициента пористости  $\varepsilon_{\text{цт}}$  в зависимости от  $(В/Ц)_{\text{цт}}$  и  $K_{\text{нр}}$  цемента

Значение $K_{\text{нр}}$ цемента, равн. ед.	Параметр	Значение $\varepsilon_{\text{цт}}$ , доли ед.											
		0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,312	0,336	0,36	0,384	0,4
0,24	В/Ц	0,24	0,264	0,288	0,312	0,336	0,36	0,384	0,4				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,47	0,535	0,6	0,66	0,734	0,8	0,864	0,9				
0,25	В/Ц	0,25	0,275	0,3	0,355	0,35	0,375	0,4	0,412				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,475	0,542	0,61	0,683	0,745	0,808	0,876	0,975				
0,26	В/Ц	0,26	0,286	0,312	0,338	0,364	0,39	0,416	0,43				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,486	0,557	0,625	0,695	0,763	0,831	0,895	0,934				
0,27	В/Ц	0,27	0,297	0,324	0,351	0,378	0,405	0,432	0,446				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,504	0,57	0,645	0,72	0,785	0,855	0,9	0,97				
0,28	В/Ц	0,28	0,308	0,336	0,364	0,392	0,42	0,448	0,462				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,514	0,585	0,66	0,732	0,805	0,875	0,945	0,985				
0,29	В/Ц	0,29	0,319	0,348	0,377	0,406	0,435	0,464	0,48				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,52	0,593	0,665	0,74	0,815	0,886	0,96	1,0				
0,3	В/Ц	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,5				
	$\varepsilon_{\text{цт}}$	0,524	0,602	0,677	0,75	0,823	0,892	0,97	1,02				

$$l_{24} = 1,1 \varepsilon_{\text{цт}} \sqrt{1/\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{д}}}, \quad (11)$$

$$l_{24\text{ч}} = 6,58 \varepsilon_{\text{цт}} \sqrt{1/\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{д}}}. \quad (12)$$

С учетом сделанных допущений глубина проникновения вещества уплотняющей добавки вглубь объема цементного теста в бетоне связана прямой зависимостью с коэффициентом его пористости и временем, а также обратной — с плотностью и динамической вязкостью раствора-фильтрата, что не противоречит физико-химической сути явления массопереноса.

Для практических расчетов по формулам (10), (11) и (12) по конкретным данным о составе бетона расчетное значение коэффициента пористости цементного теста  $\varepsilon_{\text{цт}}$  в тяжелом бетоне на заполнителях из плотных горных пород может быть принято по таблице 2. Эти данные получены профессором И. Н. Ахвердовым и приведены в работе [28, с. 126]. Для удобства пользования значение водоцементного отношения цементного теста  $(В/Ц)_{\text{цт}} = X \cdot K_{\text{нр}}$ , при  $X = (1,00-1,65)$  (по [28]) приведены после соответствующего пересчета.

Экспериментальная проверка глубины проникновения в бетон использованных в исследованиях уплотняющих его структуру веществ и составов ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  $\text{MgSiO}_2\text{F}_6$  и др.) показала удовлетворительную сходимостью расчетных и фактических данных. Отклонение в глубине слоя растворной составляющей затвердевшего бетона с уплотненной структурой при обработке неопалубленной поверхности после фор-

мования в пределах 0–120 мин составило  $|\Delta l| \sim (10-12)\%$ ; и несколько больше —  $|\Delta l| \leq 18\%$  — при обработке поверхностей бетона после снятия опалубки (разборки форм тех же образцов-кубов с ребром 100 мм) через 24 ч. В абсолютных величинах указанное отклонение составило соответственно примерно до  $(\pm 0,6)$  мм и  $(\pm 1,0)$  мм из расчета на 10,0 мм слоя растворной части бетона с измененной (более плотной) структурой.

В совокупности с общим положительным эффектом защиты твердеющего бетона уплотняющими его структуру веществами — повышением прочности сцепления слоев старого и свежего бетона, обеспечением качества сцепления с материалами последующей отделки поверхности, низкой себестоимостью работ — их применение в монолитном строительстве вполне перспективно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование базовых закономерностей теории фильтрации жидкостей в пористой среде в сочетании с физическим явлением возникновения вакуума в реагирующей системе «цемент — вода» позволило получить математические зависимости для оценки глубины диффузии вещества защитных составов при обработке ими поверхности твердеющего бетона. Благодаря этому созданы необходимые предпосылки для практической реализации разрабатываемого варианта технологии ухода за твердеющим бетоном путем использования уплотняющих его структуру веществ и составов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тейлор, К. Химия цемента. Пер. с англ. / К. Тейлор. — М.: Мир, 1986. — С. 294–345.
2. Powers, T. C., Brownard T. I. Studies of the physical properties of Hardened Portland Cement Paste (Bull. 22), p. 992, Portland Cement Association, Chicago, 1948; reprinted from J. Am. Concr. Inst. (Proc.), 1947. — P. 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993.
3. Юнг, В. Н. Технология вяжущих веществ / В. Н. Юнг, Ю. М. Бут, В. Ф. Журавлев, С. Д. Окорочков. — М.: Промстройиздат, 1952. — 262 с.
4. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. — М.: Стройиздат, 1965. — 195 с.
5. Бруссер, М. И. Исследование структурной пористости бетона и факторов ее определяющих: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 08.00.05 / М. И. Бруссер. — М., 1971. — 19 с.

6. Ахвердов, И. Н. Влияние водоцементного отношения на формирование структуры цементного камня и недостатки формул прочности бетона / И. Н. Ахвердов // *Строительная промышленность*. — 1953. — № 8. — С. 44–47.
7. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов. — М.: Госстройиздат, 1961. — 106 с.
8. Scrivener, K. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete / K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, P. L. Pratt // *Bond. Cementitious Compos: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987*. — Pittsburgh (Pa), 1988. — P. 87, 88.
9. Wang, Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste / Jia Wang // *J. Chin. Silic. Soc.* — 1987. — № 2. — P. 114–121.
10. Detwiler, R. J. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface / R. J. Detwiler, P. J. M. Monteiro, Hans-Rudolf Wenk, Zengqiu Zhong // *Cem. and Concr. Res.* — 1988. — № 5. — P. 823–829.
11. Garboczi, E. J. Digital Simulation of the Aggregate- Cement Paste Interfacial Zone in Concrete / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // *J. Mater. Res.* — 1991. — P. 196–201.
12. Трахимчик, О. Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 05.17.11; 05.17.01 / О. Е. Трахимчик; Бел. гос. технол. ун-т. — Минск, 2006. — 19 с.
13. Хигерович, М. И. Улучшение свойств бетона органическими поверхностно-активными добавками / М. И. Хигерович. — М.: ВНИИЭСМ, 1975. — 45 с.
14. Фам, Ван Хоан. Бетоны без защитного слоя для безрулонных кровель, эксплуатируемых в условиях влажного жаркого климата Вьетнама: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Ван Хоан Фам. — М., 1993. — 19 с.
15. Осама, Мохомед Мохаммед. Бетоны с химическими добавками в условиях сухого жаркого климата: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Мохомед Мохаммед Осама. — Алма-Аты, 1994. — 17 с.
16. Мбарки, Фетхи. Бетон повышенной водонепроницаемости и трещиностойкости в сухом жарком климате Туниса: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Фетхи Мбарки. — Санкт-Петербург, 2003. — 18 с.
17. Вавренюк, С. В. Эффективные защитные цементные покрытия, модифицированные полимерами: автореф. ... дис. д-ра тех. наук: 05.23.05 / С. В. Вавренюк. — М., 2006. — 38 с.
18. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. — М.: Госэнергоиздат, 1953. — 330 с.
19. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементного бетона / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. — М.: Стройиздат, 1979. — 344 с.
20. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947. — С. 11–73.
21. Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз. — М.: Мир, 1964. — С. 68–104.
22. Полубаринова-Кончина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кончина. — М.: Наука, 1977. — С. 17–88.
23. Щелкачев, В. И. Подземная гидравлика / В. И. Щелкачев, Б. Б. Лацук. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949. — С. 50–89.
24. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде / В. И. Аравин. — М.: Гостехиздат, 1953. — С. 11–80.
25. Чарный, И. А. Основы подземной гидравлики / И. А. Чарный. — М.-Л.: Гостехиздат, 1956. — 260 с.
26. Батыновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования / Э. И. Батыновский. — Минск: Стринко, 2002. — С. 108–112.
27. Батыновский, Э. И. Монолитный бетон сухого формования. Монография / Э. И. Батыновский, В. Ю. Мирончик. — Минск: Стринко, 2003. — 175 с.
28. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1981. — 464 с.
29. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. — Минск: Вышэйшая школа, 1986. — 200 с.
30. Блещик, Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона / Н. П. Блещик. — Минск: Наука и техника, 1977. — 230 с.
31. Барташевич, А. Я. Исследование структурно-технических свойств бетонной смеси, уплотненной прессованием и вакуумированием: автореф. ... дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / А. Я. Барташевич; ИСиА Госстроя БССР. — Минск, 1973. — 37 с.
32. Скрамтаев, Б. Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи: труды IV Всесоюз. конф. по бетон. и железобет. конструкциям. Часть III. Усовершенствование технологии бетона. — М.-Л.: Гос. из-во строит. лит., 1949. — С. 3–25.
33. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона / С. В. Шестоперов. — М.: Автотранспорт, 1955. — 480 с.

Статья поступила в редакцию 01.12.2011.