

органического ингибитора коррозии, но и благодаря ее способности подщелачивать жидкую фазу бетона, а также обеспечивать более плотную структуру бетона в процессе его твердения [6].

Устойчивое (пассивное) состояние стальной арматуры в бетоне с добавкой STG-3 подтверждает целесообразность ее применения для изготовления железобетонных конструкций, в том числе и предварительно напряженных с повышенными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре.

#### Список цитированных источников

1 Алексеев, С.Н. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях / С.Н. Алексеев, В.Б. Ратинов, Н.К. Розенталь, Н.М. Кашурников – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.

2 Уласевич, В.П. Некоторые свойства конструкционных бетонов, модифицированных добавкой STG-3 / В.П. Уласевич, З.Н. Уласевич, О.А. Якубовская // Вестник БрГТУ – 2007 – № 1(48) Строительство и архитектура – С. 54–59

3 Уласевич, В.П. Прогнозирование основных свойств бетонов, модифицированных добавкой суспензии торфяных гуминовых веществ / В.П. Уласевич, З.Н. Уласевич, О.А. Якубовская // Вестник ПГУ, серия F «Прикладные науки». Строительные материалы и технологии. – 2007 – № 12 – С. 58–62

4 СТБ 1168-99 Бетоны Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойства бетона. – Введ. 21.07.99 – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1999. – 16 с.

5 Уласевич, В.П. Электронно-микроскопические исследования структуры цементного камня, модифицированного добавкой STG-3 / В.П. Уласевич, О.А. Якубовская // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура – 2009 – № 1 (55). – С. 90–94

6 Уласевич, В.П. Защитные свойства бетонов, модифицированных добавкой STG-3, по отношению к стальной арматуре / В.П. Уласевич, О.А. Якубовская // Вестник БрГТУ. – 2009 – № 1(55): Строительство и архитектура – С. 94–98.

УДК 666.97; 693.54в

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА

Саназ Эгбалшик, Батяновский Э.И., Коваженкова В.И.

**Введение.** Вся совокупность физико-технических свойств тяжелого цементного бетона, включая прочностные, упруго-деформативные, эксплуатационные (водо-, коррозионную, морозостойкость и др.), непосредственно зависит от качества структуры цементного камня. В свою очередь, на ее важнейшие характеристики: плотность, пористость, проницаемость, при прочих равных условиях, определяющее влияние оказывает начальный период твердения бетона. В частности, условия влагообмена с окружающей средой, которая характеризуется пониженной влажностью при высокой положительной температуре и, особенно, в сочетании с наличием и ростом скорости движения воздуха (ветра). Эта проблема существенна как для варианта тепловой обработки сборных изделий с использованием «сухих» теплоносителей, так и для монолитного строительства в летний период года, а также в любой иной при использовании разнообразных вариантов обогрева бетона, исключая паробогрев. Среди приемов технологической защиты неопалубленных поверхностей свежесотформованного бетона или после снятия опалубки (полив, разнообразные увлажняемые посыпки и гидроизолирующие укрытия, пленкообразующие составы и пр.) не полу-

чил развития вариант естественной первичной защиты путем уплотнения структуры наружного слоя бетона. Снижение его проницаемости, за счет формирования плотного внешнего слоя цементного камня, не усложняет ведения дальнейших работ (в частности, отделки), не ухудшает сцепления с последующими слоями и может быть реализован путем нанесения соответствующих химических реагентов на защищаемые поверхности. По разработке теоретических и практических основ технологии первичной защиты бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях, развернуты исследования, результаты которых частично представлены в материале статьи.

**Физико-химические основы первичной защиты бетона** базируются на физических явлениях массо- или влагопереноса, сопровождающих начальный период твердения цементного бетона, и химическом взаимодействии наносимых на его поверхность веществ с продуктами гидролиза и гидратации клинкерных минералов цемента, в результате которого образуются новые соединения, уплотняющие структуру цементного камня на некоторую глубину. В результате сужаются или колюматируются (закупориваются) «каналы» движения жидкости [1–6], снижается или предотвращается испарение воды затворения, чем обеспечиваются условия, благоприятные для твердения цемента и, соответственно, для формирования более плотной и непроницаемой структуры цементного камня и бетона в целом.

Свежеотформованный бетон представляет собой систему, проницаемость которой для химических реагентов связана с наличием объема воды затворения и в частности, той ее части, которая образует пленку некоторой толщины на поверхности 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 [7]. В случае продолжительного сохранения жидкофазной пленки на поверхности бетона возможно нанесение порошкообразных водорастворимых реагентов, с последующим растворением их в воде и диффузией по ее объему вглубь внешнего слоя бетона (точнее, цементного теста). При отсутствии «поверхностной» воды (низкое водоцементное отношение за счет применения качественных пластифицирующих добавок, схватившийся свежеотформованный или после снятия опалубки бетон) целесообразно нанесение химических реагентов в виде водных растворов. Проникновение их в объем формирующейся структуры внешнего слоя цементного камня (бетона) во всех случаях связано как с диффузией ионов растворенных в воде веществ, так и с массопереносом раствора в пористой среде, которую представляет собой цементное тесто, трансформирующееся в цементный камень.

Количественная оценка эффективности обработки бетона, периодичность нанесения и количество химического реагента, глубина и время «пропитки» могут быть определены с учетом фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [8–10].

**Теоретические основы процесса фильтрации жидкости в пористых средах** были заложены в начале 19 в. работами Пуазейля и Хагена, установившими закономерность течения жидкости в тонких трубках в виде:

$$Q = K(dP/L), \quad (1)$$

где  $Q$  – расход жидкости в единицу времени;  $dP/L$  – градиент напоров;  $dP$  – разность напоров;  $L$  – длина трубы;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Выведение данной закономерности послужило основой для развития гидравлики как прикладной науки. На этом основании Дарси в середине 19 в предложил зависимость, отражающую фундаментальную закономерность фильтрации воды через пески. В результате экспериментов им была подтверждена прямолинейная связь между фильтрационным расходом и градиентом напора при фильтрации:

$$Q = K_{\phi} F (dP/L), \quad (2)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца;  $dP$  – перепад давления на длине участка фильтрационной среды  $L$ ;  $K_{\phi}$  – коэффициент пропорциональности, названный коэффициентом фильтрации.

Установлением этой закономерности, названной впоследствии линейным законом Дарси, было положено начало развитию новой отрасли знаний – подземной гидравлике. Закон Дарси устанавливает линейную зависимость между линейным расходом жидкости или газа и гидравлическим градиентом (уклоном, перепадом давления) в пористых средах. Он адекватно описывает характер движения поровой жидкости при относительно малых градиентах давления, в том числе при фильтрации воды через грунт.

Формула, выражающая линейный закон Дарси и используемая в современной фильтрационной гидравлике, имеет вид:

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\rho_{ж}} \frac{dP}{dl}, \quad (3)$$

для фильтрации жидкости в горизонтальном направлении, и, в случае вертикального направления фильтрации,

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\rho_{ж}} \frac{d(P \pm \rho_{ж} h)}{dh}, \quad (4)$$

где  $V_{\phi}$  – скорость фильтрации жидкости и газа;  $K_{\phi}$  – коэффициент проницаемости среды (коэффициент фильтрации);  $\rho_{ж}$  – 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, т.е. 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 имеет место потеря единицы давления на единицу длины, имеет размерность скорости (м/с) и зависит от свойств фильтрационной среды и фильтрующей жидкости.

В работе [11] 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 и водными растворами химических добавок.

Для расчетов применена формула коэффициента фильтрации «по Козени», широко используемая в фильтрационной гидравлике [8]:

$$K_{\phi} = \beta \cdot \frac{d_2^2}{\mu_0} \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2}, \quad (5)$$

где  $\beta$  – размерный эмпирический коэффициент Н/м<sup>2</sup>, принимаемый по Козени равным 8,2 и по данным работы [12]  $\beta \sim 11,4$ ;  $d_2$  – эффективный (усредненный) диаметр частиц твердой фазы, слагающих фильтрационную среду, м;  $\mu_0$  – ди-

намическая вязкость фильтрующей жидкости, Н.с/м<sup>2</sup>;  $m$ , — эффективная пористость фильтрационной среды.

Следует отметить, что в формуле Козени приведена истинная пористость фильтрационной среды « $m$ » в сухом состоянии твердой фазы. Академик Лейбензон [8] обосновал необходимость учета ее уменьшения до некоторого значения « $m_e$ » (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.

Подставив значения коэффициента фильтрации (5) в формулу (3), получим следующее выражение скорости фильтрации:

$$V_{\psi} = \beta \cdot \frac{d_1^2}{\rho_{\pi} \mu_0} \cdot \frac{m_e^2}{(1-m_e)^2} \cdot \frac{dP}{dl} \quad (6)$$

Из теории фильтрации известна [8] зависимость между пористостью среды « $m$ », скоростью фильтрации « $V$ » и средней скоростью движения жидкости в порах « $W$ » в виде:  $W = V_{\psi} / m$ . (7)

Определим скорость движения жидкости в порах  $W$ , подставив выражение скорости фильтрации (6) в зависимость (7):

$$W_{\psi} = \beta \cdot \frac{d_1^2}{\rho_{\pi} \mu_0} \cdot \frac{m_e^2}{(1-m_e)^2} \cdot \frac{dP}{dl} \quad (8)$$

Для фильтрации жидкости без избыточного давления, как это будет иметь место при сорбции твердеющим цементным раствором реагентов в виде уплотняющих структуру добавок, градиент давления ( $dP/dl$ ) будет иметь «пренебрежительно» малую величину. В общем случае обозначим ее « $P_c$ » (давление, создаваемое силами сорбции). Тогда зависимость (8) может быть записана в виде:

$$W_{\psi} = \beta \cdot \frac{P_c \cdot d_1^2}{\rho_{\pi} \mu_0 \cdot \ell} \cdot \left( \frac{m_e}{1-m_e} \right)^2 \quad (9)$$

Приняв условие, при котором раствор реагента, нанесенный на поверхность бетона, при средней скорости движения в порах « $W$ » будет проникать на глубину « $\ell$ » за время « $\tau$ », то есть:  $\tau = \ell / W$ , и, подставив выражение (9) в эту зависимость вместо « $W$ » получим

$$\tau = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\rho_{\pi} \mu_0 \ell^2}{P_c} \cdot \left( \frac{1-m_e}{m_e \cdot d_1} \right)^2 \cdot c, \text{ или:} \quad (10)$$

$$\ell = \frac{m_e \cdot d_1}{1-m_e} \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot P_c \cdot \tau}{\rho_{\pi} \mu_0 \cdot c}} \cdot M. \quad (11)$$

Полученные формулы учитывают взаимосвязь времени и «глубины» проникновения фильтра 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, а также для разработки зависимостей, адекватно отражающих этот процесс.

**Заключение.** Фундаментальные теоретические представления классической фильтрационной гидравлики, получившие развитие в течение более полутора столетий и подтвержденные широким применением в современных условиях

хозяйствования и при выполнении научных исследований, обеспечивают возможность разработки теоретических основ фильтрационных аспектов технологии первичной защиты твердеющего бетона путем «пропитки» его с поверхности составами, уплотняющими структуру цементного камня (бетона).

#### Список цитированных источников

- 1 Дахла, М Гидрофобно-кольматирующая пропитка бетона в условиях жаркого климата. автореф. дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Дахла Мохамед; Харьков. гос. университет строительства и архитектуры – Харьков, 1996 – 21 с
- 2 Крашенивникова, Л.А Гидратация и твердение портландцемента в присутствии функциональных добавок в составе сухих строительных смесей. автореф. дис. канд. тех. наук: 05.17.11 / Крашенивникова Лариса Алексеевна, Санкт-Пб гос. технолог. институт – Спб, 1999. – 18 с
- 3 CPI - Concrete Plant International = CPI - Международное бетонное производство: журнал рус. Изд. – 2008, август № 4 – с. 40
- 4 Варенюк, С.В. Эффективные защитные цементные покрытия, модифицированные полимерами: автореф. дис. док. Тех. наук: 05.23.05: Варенюк Светлана Викторовна; Моск. Гос. стр. ун-т – Москва, 2006. – 37 с
- 5 Темкин, Е.С. Технология бетона для сухого жаркого климата с использованием солнечной энергии: учеб. пособие для вузов / Е.С. Темкин. – Москва: АСВ, 2006. – 68 с.
- 6 Трахимчук, О.Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния. автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.11: 05.17.01 / О.А. Трахимчук; Бел. гос. технол. ун-т. – Минск, 2006. – 19 с.
- 7 Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона – М.: Стройиздат, 1981. – С. 8-220.
- 8 Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.: Л.: Гостехиздат, 1947. – С. 11-73.
- 9 Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы – М.: Мир, 1964 – С. 68-104.
- 10 Полубаринова-Кончина, П.Я. Теория движения грунтовых вод – М.: Наука, 1977. – С. 17-88.
- 11 Батыновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формирования: монография / Э.И. Батыновский – Мн.: НПО000 «Стринко», 2002. – С. 61-86.

УДК 666.972

## СТОЙКОСТЬ БЕТОНА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Бондарович А.И., Батыновский Э.И.

**Введение:** В процессе эксплуатации бетона дорожных покрытий, элементов мощения и благоустройства они подвергаются механическим воздействиям: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени. Этот аспект деструктивного воздействия на бетон стандартные методы не учитывают, как по причине непредсказуемости вероятных условий эксплуатации строительных изделий и конструкций, изготовленных из проверяемого бетона, так и из-за неопределенности критериев оценки их воздействия на бетон. Несмотря на (развитие теории морозостойкости [1–7]) и то, что еще в 30-ых годах XX века Ю.А. Нилендер выявил непосредственное влияние напряженного состояния бетона от внешних (и «внутренних») воздействий на его морозостойкость и долговечность а в 50-60-х годах под руководством В.М. Москвина [8] это направление исследований получило развитие, накопленной информации недостаточно для того, чтобы попытаться количественно оценить влияние механических нагрузок на морозо-, солестойкость бетона особенно с учетом того факта,