

УДК 691.327

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В ПОРОВОЙ СРЕДЕ
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕГО УХОДА****В.В. КРАВЧЕНКО***(Брестский государственный технический университет)*

Приведены основные положения предлагаемой расчетной модели, позволяющей оценивать распределение воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных от внешней среды условиях, учитывая внутренний уход с насыщенным водой пористым заполнителем. В рамках предлагаемой модели представлены результаты моделирования исследуемых процессов.

Ключевые слова: цементный камень, внутренний уход, фильтрация воды, проницаемость, распределение воды.

Под внутренним уходом (англ. – internal curing) подразумевается процесс, при котором гидратация цемента происходит с участием дополнительной воды, доступной для реакций гидратации, но не являющейся частью воды затворения [1].

Внутренний уход предполагает введение в структуру цементной системы специальных резервуаров (источников) дополнительной воды, которая затем в процессе гидратации мигрирует в поровую среду цементного камня, заполняя ее обезвоженные поры и предотвращая развитие процесса «самовысыхания» (англ. – self-desiccation).

Внутренний уход является эффективным способом борьбы с аутогенной усадкой, обусловленной процессом «самовысыхания» в высокоэффективных бетонах. Аутогенная усадка является неотъемлемым свойством бетона, наибольший эффект которой проявляется в изолированных условиях, когда бетон не теряет влагу в окружающую среду, что характерно для плотной структуры высокоэффективных бетонов.

В качестве резервуаров дополнительной воды используют: а) мелкие фракции природных или искусственных легких пористых заполнителей, которые адсорбируют требуемое количество дополнительной воды в своей поровой среде; б) адсорбирующие полимеры, которые адсорбируют требуемое количество дополнительной воды в своей структуре, изменяя при этом свой первоначальный размер.

Один из ключевых параметров процесса внутреннего ухода – распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня от поверхности резервуара, т.е. на какую глубину она способна мигрировать в его поровую среду. Мигрируя в поровую среду цементного камня, дополнительная вода заполняет его обезвоженные поры, располагаемые вокруг резервуара на расстоянии, равном глубине ее миграции, т.е. вокруг каждого резервуара располагается определенный объем цементной матрицы, подверженной внутреннему уходу. Соответственно, объем цементной матрицы, располагаемый на расстоянии, большем, чем то, на которое способна мигрировать дополнительная вода от поверхности резервуара, будет не доступен для внутреннего ухода.

Таким образом, от значения глубины миграции дополнительной воды зависит количество дополнительной воды, мигрирующей в поровую среду цементного камня, предопределяя продуктивность внутреннего ухода в высокоэффективных бетонах.

Распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня можно оценить при моделировании процесса фильтрации дополнительной воды в поровой среде цементного камня. В данной работе моделируется распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в условиях внутреннего ухода с использованием насыщенных водой пористых заполнителей.

Модель фильтрации воды в поровой среде цементного камня. В классическом представлении движение потока жидкости через пористую среду, в которой все поры полностью заполнены жидкостью, описывается законом Дарси:

$$\mathbf{v}_w = -\frac{\mathbf{k}}{\eta_w} \nabla p_w, \quad (1)$$

где \mathbf{v}_w – вектор скорости потока жидкости; \mathbf{k} – тензор абсолютной проницаемости поровой среды 2 ранга; p_w – давление в поровой жидкости; η_w – динамическая вязкость жидкости.

Размер гелевых пор обуславливает тот факт, что основные процессы в цементном камне, происходящие при гидратации (например, процесс «самовысыхания», проявление капиллярного давления), раз-

виваются в основном в капиллярной пористости, поэтому в данной работе моделирование фильтрации влаги в поровой среде цементного камня рассматривается именно в капиллярной пористости.

Вместе с тем необходимо учитывать, что поровая среда цементного камня в процессе гидратации частично заполнена жидкой фазой (свободная и адсорбированная вода) и частично газообразной фазой. В таком случае уравнение закона Дарси может быть представлено в следующем виде [2; 3]:

$$m_w \mathbf{v}_w = -\rho_w \frac{\mathbf{k}_w}{\eta_w} \nabla p_w = -\rho_w \frac{\mathbf{k} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_w, \quad (2)$$

где m_w – количество жидкости в единице объема поровой среды; \mathbf{k}_w – тензор проницаемости для жидкой фазы 2 ранга; $k_{r,w}$ – относительная проницаемость поровой среды для жидкой фазы; ρ_w – плотность воды.

Относительная проницаемость – это отношение фазовой проницаемости (жидкой или газообразной) к абсолютной (базовой) проницаемости поровой среды:

$$k_{r,w} = \frac{k_w}{k},$$

где k_w – проницаемость поровой среды для жидкой фазы; k – абсолютная проницаемость поровой среды.

Для нахождения коэффициента относительной проницаемости для жидкой фазы можно использовать следующую зависимость [2; 3]:

$$k_{r,w} = \sqrt{S_{w,p}} \cdot \left(1 - \left(1 - S_{w,p}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2,$$

где $S_{w,p}$ – степень насыщения (заполнения) поровой среды цементного камня влагой; m – параметр, определяемый экспериментально на основе изотерм сорбции исследуемого пористого материала, принятый по данным [3] равным 0,5.

Процесс фильтрации в поровой среде цементного камня может быть описан уравнениями неразрывности (непрерывности), выражающими закон сохранения массы в элементарном объеме поровой среды [2; 3]:

$$\text{- для жидкой фазы:} \quad \frac{\partial m_w}{\partial \tau} + \nabla \cdot (m_w \mathbf{v}_w) = -\frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau} - \frac{\partial m_{hyd}}{\partial \tau} + \frac{\partial m_{w,ic}}{\partial \tau}; \quad (3)$$

$$\text{- для газообразной фазы:} \quad \frac{\partial m_g}{\partial \tau} + \nabla \cdot (m_g \mathbf{v}_g) = \frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau}$ – интенсивность стока (источника) в результате процесса парообразования; $\frac{\partial m_{hyd}}{\partial \tau}$ – интенсив-

ность стока в результате процесса гидратации; $\frac{\partial m_{w,ic}}{\partial \tau}$ – интенсивность источника в результате процесса

внутреннего увлажнения; m_g – количество газа в единице объема поровой среды цементного камня; \mathbf{v}_g – вектор скорости потока газа.

При моделировании процесса фильтрации в поровой среде цементного камня приняты следующие предпосылки и допущения:

- цементный камень является изотропной средой;
- при твердении в изолированных условиях интенсивностью стока в результате процесса парообразования пренебрегают;
- в поровой среде в процессе гидратации находится свободная вода и вода, адсорбированная на стенках капилляров;
- потребление воды из поровой среды в процессе гидратации происходит за счет образования химически связанной воды и воды цементного геля;
- давлением газообразной фазы в поровой среде пренебрегают, поскольку, по данным [2], в слабо-проницаемых пористых материалах оно не превышает значения атмосферного давления;
- плотность химически связанной воды, воды цементного геля и воды, адсорбированной на стенках капилляров, принимают равной плотности обычной воды.

Основываясь на сформулированных выше предпосылках и допущениях, уравнение неразрывности потока для жидкой фазы можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w (V_{w,c} + V_{w,ads})) + \nabla \cdot (m_w \mathbf{v}_w) = - \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w (V_{w,ne} + V_{w,g})) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w V_{w,ic}), \quad (5)$$

где $V_{w,c}$ – относительный объем свободной воды в цементном камне; $V_{w,ads}$ – относительный объем адсорбированной воды в цементном камне; $V_{w,g}$ – относительный объем воды цементного геля в цементном камне; $V_{w,ne}$ – относительный объем химически связанной воды в цементном камне; $V_{w,ic}$ – относительный объем дополнительной воды от внутреннего ухода в цементном камне.

Подставляя (2) в (5), получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,c} + V_{w,ads}) + \nabla \cdot \left[- \frac{k \mathbf{I} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_w \right] = - \frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,ne} + V_{w,g}) + \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}, \quad (6)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор 2 ранга.

Для цементной системы, твердеющей в изолированных условиях, можно записать следующее уравнение баланса объемов воды в произвольный момент времени от начала твердения:

$$V_{w,0} = V_{w,c} + V_{w,ne} + V_{w,g} + V_{w,ads}, \quad (7)$$

где $V_{w,0}$ – начальный относительный объем воды (воды затворения) в цементном камне.

Исходя из уравнения (7) справедливо выражение:

$$\frac{\partial V_{w,0}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,c} + V_{w,ads} + V_{w,ne} + V_{w,g}) = 0. \quad (8)$$

Поскольку давлением газообразной фазы p_g в поровой среде пренебрегают, давление в поровой жидкости p_w принимают равным капиллярному давлению p_c , действующему в поровой среде:

$$p_w = p_g - p_c \approx -p_c. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (6), получим окончательный вид уравнения, описывающего процесс фильтрации влаги в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных условиях, с учетом дополнительной воды от внутреннего ухода:

$$\nabla \cdot \left[\frac{k \mathbf{I} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_c \right] = \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}. \quad (10)$$

Модель проницаемости цементного камня. Ключевым параметром в уравнении Дарси является коэффициент проницаемости поровой среды, характеризующий возможность фильтрации в ней потока жидкости или газа.

В данной работе коэффициент проницаемости поровой среды цементного камня определяют на основании модели, предложенной в работе [4], основанной на теории эффективной среды:

$$\frac{(1 - \phi_c) \cdot (k_l - k)}{k_l + A \cdot k} + \frac{\phi_c \cdot (k_h - k)}{k_h + A \cdot k} = 0; \quad (11)$$

$$A = \frac{1 - \phi_{c,cr}}{\phi_{c,cr}}, \quad (12)$$

где ϕ_c – относительный объем капиллярной пористости в цементном камне; k_l – коэффициент проницаемости низкопроницаемой фазы цементного камня; k_h – коэффициент проницаемости высокопроницаемой фазы цементного камня; $\phi_{c,cr}$ – наименьший относительный объем капиллярной пористости, при котором наблюдается перколяция пор, принимаемый равным $0,18 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [4].

Коэффициент высокопроницаемой фазы цементного камня, к которой относят капиллярную пористость, определяют как

$$k_h = \frac{1,8 \cdot (1 - \phi_{c,cr})^2}{226} \cdot r_{p,c}^2. \quad (13)$$

В выражении (13) $r_{p,c}$ – радиус пор, соответствующий экстремальному значению на дифференциальной кривой распределения капиллярной пористости.

Коэффициент низкопроницаемой фазы цементного камня, к которой относят пористость цементного геля, определяют по следующей зависимости:

$$k_f = k_{CSH} \cdot \left(1 - \frac{1 - V_{hp,CSH}}{1 - V_{hp,CSH}^{per}} \right)^2, \quad (14)$$

где k_{CSH} – коэффициент проницаемости цементного геля, принимаемый равным $7 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2$ [4]; $V_{hp,CSH}$ – относительный объем цементного геля в цементном камне; $V_{hp,CSH}^{per}$ – относительный объем цементного геля в цементном камне в момент перколяции.

На рисунке 1 представлен результат моделирования коэффициента проницаемости поровой среды цементного камня в процессе твердения, полученный по модели [4] при различных значениях водоцементного отношения (В/Ц).

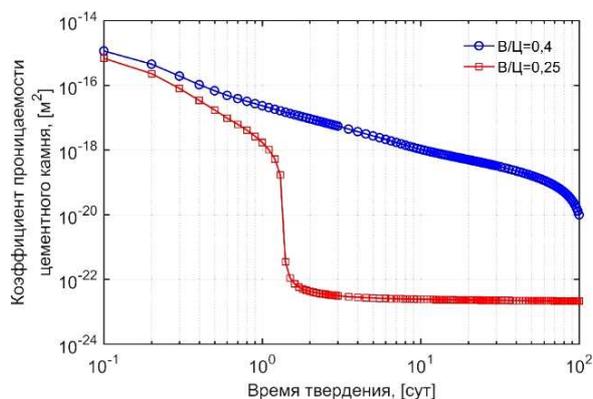


Рисунок 1. – Изменение коэффициента проницаемости цементного камня в процессе твердения (рассчитано по исходным данным [5])

Моделирование распределения воды в поровой среде цементного камня. Наиболее удобно оценивать распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня через изменение степени насыщения пор влагой $S_{w,p}$ в пределах предполагаемой (ожидаемой) глубины миграции дополнительной воды l_{mig} , путем решения дифференциального уравнения (10). Под степенью насыщения пор цементного камня влагой следует понимать отношение объемного количества жидкой фазы в его поровой среде (свободной и адсорбированной воды, а также дополнительной воды, полученной в результате внутреннего увлажнения) к общему объему пор.

Расчетная область, для которой находят решение дифференциального уравнения (10), представляет собой трехмерное пространство Ω , ограниченное двумя сферами радиусами

$$r_1 = M[r_{lwa}] \text{ и } r_2 = M[r_{lwa}] + l_{mig}.$$

Здесь $M[r_{lwa}]$ обозначает математическое ожидание величины радиуса гранул пористого заполнителя. Данная пространственная область Ω имитирует объем цементной матрицы, располагаемый вокруг гранулы пористого заполнителя в пределах предполагаемой глубины миграции дополнительной воды l_{mig} .

Поскольку рассматриваемая пространственная область Ω является осесимметричной, а цементный камень – изотропной средой, это позволяет рассмотреть решение дифференциального уравнения (10) в двумерной расчетной области (рисунок 2).

Для построения двумерной расчетной области используют исходные данные по предполагаемой глубине миграции дополнительной воды l_{mig} и математическому ожиданию величины радиуса гранул пористого заполнителя $M[r_{lwa}]$.

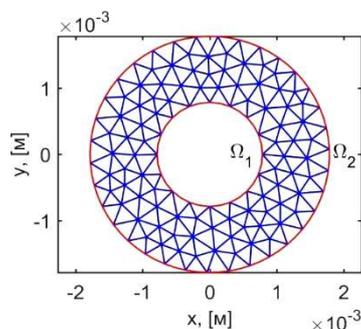
В двумерной области дифференциальное уравнение (10) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial S_{w,p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C \frac{\partial S_{w,p}}{\partial y} \right) = f; \quad C = \frac{k \cdot k_{r,w}}{\eta_w} \cdot \frac{\partial p_c}{\partial S_{w,p}}; \quad f = \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}. \quad (15)$$

Представляя исследуемое время твердения в виде равномерной временной сетки $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta\tau$ (здесь $\Delta\tau$ – временной шаг; i – произвольный узел сетки), для дифференциального уравнения (15) принята следующая схема аппроксимации:

$$\nabla \cdot [C_i \nabla (S_{w,p})_{i+1}] = f_i, \quad (16)$$

где $C_i = C(\tau_i)$ и $f_i = f(\tau_i)$, определяемые по (15).



Ω_1 , Ω_2 – соответственно внутренняя и внешняя границы расчетной области

Рисунок 2. – Двухмерная расчетная область решения дифференциального уравнения (10) с сеткой метода конечных элементов для фракции пористого заполнителя 1,18...2,36 мм и предполагаемой глубины миграции влаги 1 мм

Для нахождения решения дифференциального уравнения (16) в двухмерной расчетной области применяют метод конечных элементов, граничным условием при решении которого служит условие Дирихле:

$$(S_{w,p})_{i+1} \Big|_{\Omega_i} = S_{w,p}(\tau_{i+1}), \quad (17)$$

где Ω_i – внутренняя граница двухмерной расчетной области.

В качестве фактического значения глубины миграции влаги принимают значение, при котором степень насыщения пор влагой на внутренней и внешней границе расчетной области на протяжении всего исследуемого временного интервала будет отличаться не более чем на заданную величину. В практических расчетах значение этой величины рекомендуется принимать равным не более 10%.

На рисунке 3 представлен результат моделирования степени насыщения пор цементного камня влагой в процессе твердения, полученный при решении дифференциального уравнения (15) в двухмерной расчетной области для фракции пористого заполнителя 1,18...2,36 мм и предполагаемой глубины миграции влаги 1 мм.

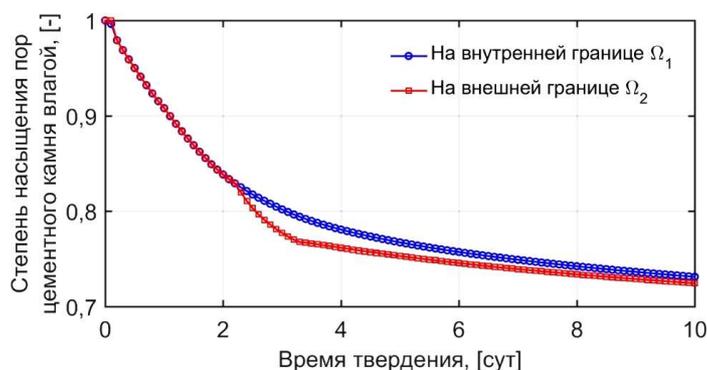


Рисунок 3. – Изменение степени насыщения пор влагой в цементном камне с учетом внутреннего ухода в процессе твердения в изолированных условиях (рассчитано по исходным данным [7])

Необходимые параметры $S_{w,p}$, p_c , $V_{w,ic}$ и другие для определения коэффициентов дифференциального уравнения (15) рассчитаны по методике, приведенной в работе [6].

Заключение. На основании результатов проведенного исследования представлены основные положения предлагаемой расчетной модели, которая позволяет оценивать распределение воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных условиях с учетом внутреннего ухода с насыщенным водой пористым заполнителем.

Показано, что основным фактором, оказывающим существенное влияние на глубину миграции дополнительной воды в поровую среду цементного камня, является ее абсолютная проницаемость, которая, в свою очередь, исходя из результатов численного моделирования, зависит от водоцементного отношения.

Значительное снижение абсолютной проницаемости поровой среды цементного камня, наблюдаемое при низких значениях водоцементного отношения в первые сутки твердения, обуславливает существенное различие в значениях степени насыщения пор влагой на внешней и внутренней границе двухмерной расчетной области. Вместе с тем, как видно из результатов моделирования, после резкого уменьшения абсолютной проницаемости при низких значениях водоцементного отношения в начальный период твердения, в дальнейшем её изменение происходит не столь интенсивно. По-видимому, этот факт, а также увеличение капиллярного давления в процессе твердения, обусловленное процессом «самовысыхания» цементного камня объясняет то, что впоследствии значение степени насыщения пор влагой на внешней границе расчетной области постепенно приближается к значению на внутренней границе.

Таким образом, на основании результатов моделирования, делаем вывод, что первые сутки твердения цементного камня являются ключевым моментом времени при определении глубины миграции дополнительной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Light-weight Aggregate : ACI Committee 308 / American Concrete Institute. – ACI, 2013. – 12 P. – ACI (308-213) R-13.
2. Coussy, O. Poromechanics / O. Coussy. – Chichester : John Wiley & Sons, 2004. – 312 p.
3. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy [et al.] // Materials and Structures. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
4. Cui, L. Permeability and pore structure of OPC paste / L. Cui, J.H. Cahyadi // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol. 31, iss. 2. – P. 277–282.
5. Tazawa, E. Prediction Model for Autogenous shrinkage of concrete with different type of cement / E. Tazawa, S. Miyazawa // Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology : Proceedings 4th International Seminar, Gaithersburg, 20 June 2005 / National Institute of Standards and Technology ; ed.: B. Persson, D. Bentz, L. Nilsson. – Gaithersburg, 2005. – P. 125–139.
6. Кравченко, В.В. Моделирование параметров состояния поровой среды цементного камня в рамках концепции «внутреннего увлажнения» / В.В. Кравченко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 28–41.
7. Lura, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete / P. Lura. – Delft : Delft University Press, 2003. – 180 p.

Поступила 17.12.2018

MODELING OF WATER DISTRIBUTION IN THE POROUS MEDIA CEMENT PASTE WITH INTERNAL CURING

V. KRAVCHENKO

The theoretical aspects proposed model the water distribution in the porous media cement paste hardened in sealed condition with internal curing using presoaked lightweight aggregates are described, including the results of modeling.

Keywords: *cement paste, internal curing, water transport, intrinsic permeability, water distribution.*