

Филимонова Н. В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Брестский государственный технический университет (БрГТУ), Брест

КОНЦЕПЦИЯ ВНУТРЕННЕГО УВЛАЖНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

Высокие эксплуатационные характеристики напрягающих бетонов обусловлены их низкой проницаемостью. Плотная структура цементного камня формируется уже на ранней стадии гидратации, что в определенных условиях становится препятствием для обеспечения необходимых влажностных условий твердения бетона. Дефицит воды в структуре приводит к снижению деформаций расширения, развитию аутогенной усадки в раннем возрасте, неравномерному изменению объема твердеющего цементного камня. Проблема влажностного ухода за напрягающим бетоном может быть решена на базе концепции внутреннего увлажнения. В работе представлены основные ее положения, а также перспективы их применения в технологии напрягающего бетона.

Введение

Эффективность применения напрягающего бетона определяется сочетанием конструктивных и технологических факторов.

Основным конструктивным фактором, позволяющим регулировать величину связанных деформаций, является процент и способ армирования. Среди технологических факторов большое значение имеют внешние условия, в которых находится материал в период формирования его эксплуатационных и физико-механических характеристик.

Как следует из опыта применения напрягающего бетона высокой энергоактивности [1], наилучших характеристик прочности и самонапряжения достигают бетоны, твердеющие в условиях двух- и трехосного армирования. Эффективно применение высокоактивных составов в обойме (сталетрубобетонные конструкции). С другой стороны, эти конструктивные решения не позволяют соблюдать строгие технологические требования, предъявляемые к условиям твердения напрягающего бетона. Так, в стальной оболочке практически невозможно обеспечить необходимые водные или нормально-влажностные условия хранения. При этом значительные потери связанных деформаций расширения снижают эффективность совместной работы бетонного ядра со стальной обоймой.

Вместе с тем, конструкции с большой площадью открытой поверхности (плиты покрытия полов, дорог, аэродромов и пр.), обильно увлажняемые поливом, также имеют недостатки, которые обус-

ловлены неравномерным изменением объема бетона по толщине изделия. Градиент влажности в сечении бетонируемого элемента приводит к формированию неравномерной структуры пористости, что в конечном итоге отражается на своеобразном развитии деформаций физической усадки, и спустя некоторое время приводит к искривлению плиты с последующим развитием трещин.

Внимание к исследованию усадочных процессов особенно возросло с появлением и применением высококачественных бетонов, составы которых отличаются низким водоцементным отношением и наличием тонкодисперсных наполнителей, модифицирующих структуру пористости. В таких бетонах интенсивно развиваются усадочные деформации, особенно значительные в раннем возрасте. Несколько десятков лет назад исследователям воздушной физической усадки этот факт показался бы, по меньшей мере, странным, поскольку плотная структура с незначительной открытой капиллярной пористостью является надежной защитой от потерь влаги и развития усадочных трещин. Однако, комплексная оценка процессов структурообразования, в особенности процессов гидратации цемента, позволили выявить еще одну причину развития усадочных деформаций – при В/Ц ? 0,3 количества свободной воды в структуре недостаточно для гидратации. Уже в начальный период твердения значительная ее часть переходит в химически связанное состояние, и в обезвоженных порах возникает отрицательное капиллярное давление – известная причина деформаций усадки. Так в конструкциях, изготавливаемых из «бетонов нового поколения», на смену воздушной физической усадке пришли деформации, обусловленные самовысушиванием структуры – деформации аутогенной усадки.

Водные условия хранения не всегда эффективны в борьбе с аутогенной усадкой, поскольку высокая плотность структуры препятствует свободной миграции влаги во внутренние слои конструкций. В этой связи практически одновременно с внедрением в практику бетонов нового поколения появилась идея распределить источник увлажнения равномерно во всем объеме материала. В 1991 году *Philleo R.* [2,3] предложил использовать с этой целью легкий заполнитель, предварительно насыщенный водой. Преимущества нового способа снабжения структуры водой оказались настолько очевидны, что на базе его исследований развилось целое направление в технологии ухода за твердеющим бетоном, а сама идея получила название «концепция внутреннего увлажнения» (или внутреннего ухода, от англ. *internal curing*).

Основные положения концепции внутреннего увлажнения

Согласно терминологии *ACI Committee 308* под «внутренним увлажнением» подразумевается процесс, при котором гидратация цемента происходит с участием дополнительной, доступной для реакции воды, находящейся внутри структуры, но не являющейся частью воды затворения (не смешиваемой с цементом в момент приготовления бетонной смеси) [4].

Эта дополнительная вода резервируется в пористых гранулах специально добавляемого предварительно насыщенного легкого заполнителя – так называемого «увлажняющего агента».

В качестве «увлажняющего агента» используют мелкие фракции природных и искусственных пористых заполнителей с требуемыми сорбционными свойствами. Наилучшими характеристиками сорбции/десорбции обладают специальные материалы, разрабатываемые в исследовательских лабораториях (адсорбирующие полимеры, материалы, выпускаемые под различными торговыми марками) [5].

За рубежом метод внутреннего увлажнения уже прошел апробацию и успешно зарекомендовал себя в практической деятельности. В Беларуси только предстоит знакомство с ним, но уже сегодня необходимо отметить: этот способ значительно упрощает процедуру ухода за твердеющим бетоном и может сыграть большую роль в развитии перспективных технологий напрягающего бетона.

Предварительные исследования, проведенные в БрГТУ [6], показали, что концепция внутреннего увлажнения эффективна не только для снижения деформаций усадки, но и для повышения эффективности применения расширяющихся сульфоалюминатных композиций (рис. 1). Учитывая опыт зарубежных и собственных исследований можно с уверенностью утверждать, что уже в ближайшем будущем внутреннее увлажнение позволит реализовывать самые разнообразные конструктивные решения с соблюдением всех технологических особенностей возведения конструкций из напрягающего бетона.

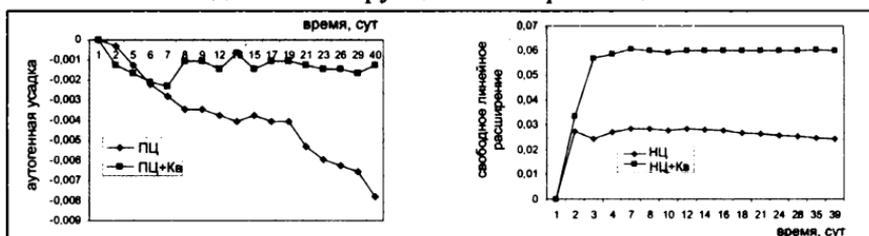


Рис. 1. Влияние предварительно насыщенного пористого заполнителя на собственные деформации цементного камня [6]

ПЦ – цементный камень на портландцементе, твердеющий в изолированных условиях, ПЦ – то же, на напрягающем цементе, Кв – наличие гранул керамзитового песка, предварительно насыщенного водой

Оценка характеристик цемента и пористых заполнителей при расчете состава бетона с внутренним увлажнением

Основная задача при проектировании составов с позиций концепции внутреннего увлажнения состоит в определении оптимальной концентрации увлажняющего агента. Легкий заполнитель, используемый для обеспечения равномерного внутреннего увлажнения, вводится в бетонную смесь взамен части тяжелого заполнителя. Его количество назначается на основании комплексной оценки характеристик применяемого цемента и пористых гранул с учетом требуемых свойств бетона (рис. 2).

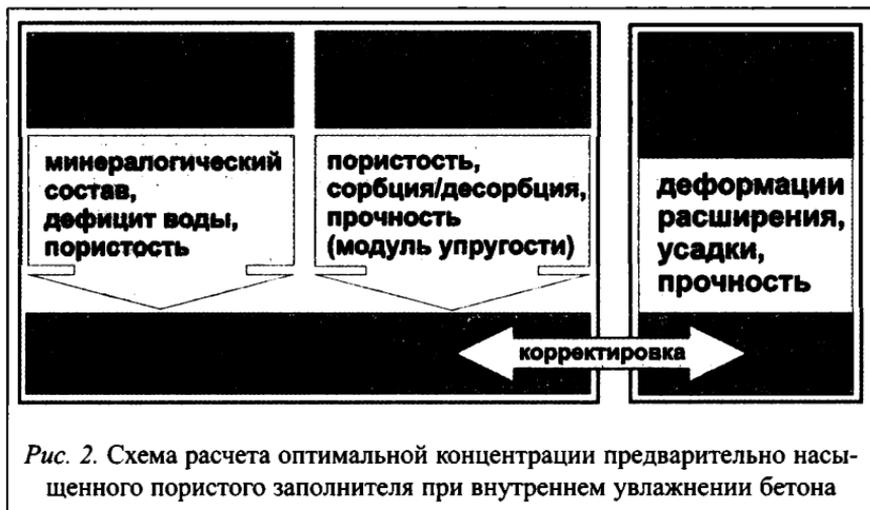


Рис. 2. Схема расчета оптимальной концентрации предварительно насыщенного пористого заполнителя при внутреннем увлажнении бетона

Параметры исходных материалов, необходимые для расчета оптимальной концентрации увлажняющего агента, определяются расчетно-экспериментальными методами. Выбор метода зависит от характеристик материалов.

Практически всегда расчету состава бетона предшествует экспериментальная оценка пористости, водопоглощения и гранулометрического состава заполнителя. Анализ параметров цемента и цементного камня (пористость, проницаемость, химическая усадка) более теоретизирован, и здесь часто находят применение различные методы моделирования структуры цементного камня. В частности, *Bentz D. и др.* для расчета количества резервируемой воды, необходимой для заполнения контракционного объема, предлагают использовать разработанную ими гидратационную модель-симулятор [4, 7].

В общем случае расчет, предложенный авторами [4], сводится к определению величин химической усадки, характерных для реакций гидратации каждого минерала, с последующим их суммированием. Модель ориентирована на применение портландцемента и не предусматривает наличия интенсивных сульфоалюминатных взаимодействий в структуре цементного камня. Поэтому, для расчета дефицита воды в бетоне на напрягающем цементе целесообразно пользоваться гидратационной моделью, учитывающей контракционные эффекты реакций в сульфоалюминатных системах [8].

Кроме того, баланс объемов в структуре расширяющегося цементного камня зависит не только от стехиометрии реакции, но и от деструктивных процессов, в результате которых на этапе интенсивного внешнего увеличения объема происходит реструктуризация пористости, обусловленная саморазрушением и разрыхлением структуры (при локализованном накоплении объема этtringита). Вклад сульфоалюминатных взаимодействий в изменение объемных характеристик пористости обязательно должен быть учтен при расчете резервируемого количества воды, предназначенной для заполнения порового пространства твердеющего цементного камня. К решению этой задачи следует привлекать обобщенные модели-симуляторы структурообразования расширяющихся цементных систем [9, 10, 16], позволяющие рассчитывать баланс объемов в процессе гидратации и прогнозировать развитие параметров пористости с учетом деструктивных процессов.

Большое значение при подборе состава бетона имеет выбор пористого заполнителя с оптимальным соотношением параметров водонасыщения и прочности. Например, применение керамзитового песка в ряде случаев не позволяет обеспечить одновременно требуемую прочность и полную компенсацию усадки. В этой связи состав бетона корректируется с учетом допусков, диктуемых рассматриваемой ситуацией. Так, если для обеспечения высокой прочности требуется ограничить количество добавляемого легкого заполнителя, следует ожидать развития незначительных деформаций усадки. А допустимо ли такое поведение материала, будет определяться индивидуально условиями его эксплуатации.

Очевидно, что при расчете концентрации пористых гранул в первую очередь следует ориентироваться на степень их насыщения водой. При этом, как отмечают *D. Bentz и др.* [4], некорректно считать, что вся вода, находящаяся в гранулах, будет мигрировать в поры це-

ментного камня, поэтому количество пористых гранул должно корректироваться с учетом десорбции заполнителя. В работе [4] эти характеристики предложено определять выдерживанием предварительно насыщенного заполнителя над растворами различных солей калия, позволяющих поддерживать постоянную влажность среды в пределах 80...97%. Авторы утверждают, что именно такая влажность устанавливается в поровом пространстве цементного камня в период проявления усадочных деформаций, и рекомендуют ориентироваться не на поглощающую способность пористых гранул, а на их готовность отдавать воду в таких условиях.

В этом подходе выражен своеобразный взгляд на механизм массопереноса в поровом пространстве, который сводится к миграции влаги за счет испарения и капиллярной конденсации. Вместе с тем, многие авторы утверждают, что главной движущей силой миграции воды является разность капиллярных потенциалов пор цементного камня и заполнителя. Согласно зависимости Лапласа, чем меньше радиус поры, тем значительнее отрицательное капиллярное давление и тем интенсивнее пора подтягивает воду из более крупных капилляров. Чтобы установить возможность миграции воды под действием капиллярных сил, при выборе или оценке эффективности легкого заполнителя как увлажняющего агента необходимо сопоставлять его пористость с пористостью цементного камня.

В большинстве случаев поры заполнителя отличаются значительно большими, по сравнению с цементным камнем, размерами и теряют воду еще в процессе перемешивания. При этом изменяется водоцементное отношение, ухудшаются эксплуатационные свойства бетона и, разумеется, минимизируется эффект внутреннего увлажнения. Поэтому помимо сорбционных характеристик заполнителя важным критерием при оценке его эффективности является водоудерживающая способность.

Интересным примером оптимального распределения радиусов пор в объеме пористой гранулы является керамзит. Уплотненная мелкопористая оболочка, образующаяся на поверхности керамзитовых гранул в процессе их изготовления (рис. 3), надежно удерживает воду в более крупных внутренних порах до тех пор, пока в цементном камне не появится дефицит объема. Только в этом случае вода из поверхностного слоя заполнителя мигрирует в поры цементного камня, а на ее место приходит новая, из более крупных пор, для которых обезвоживание не представляет серьезной угрозы с точки зрения развития капиллярного давления.

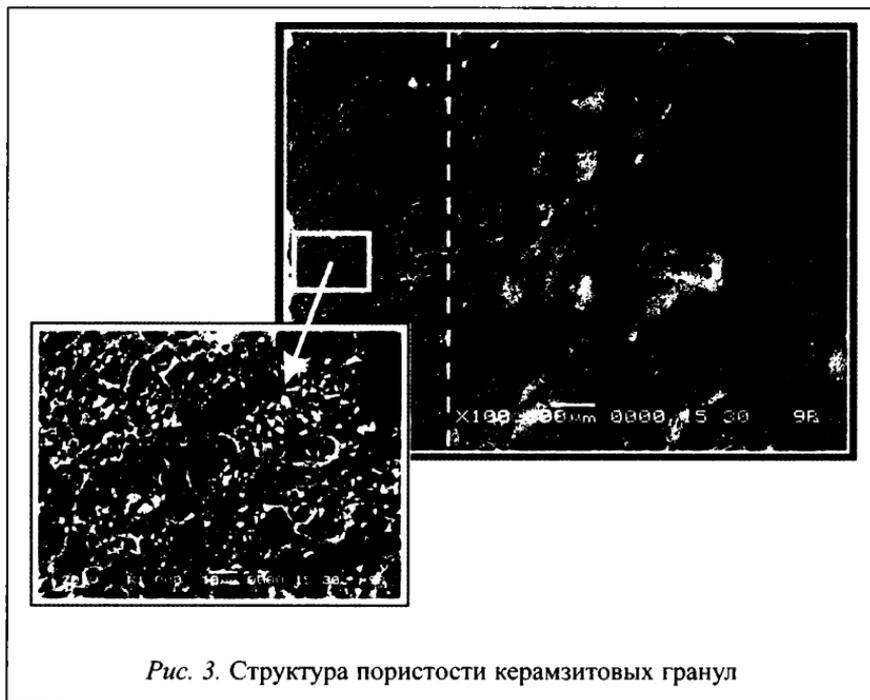


Рис. 3. Структура пористости керамзитовых гранул

Наличие оболочки имеет и свои недостатки: интегральная плотность зерна увеличивается тем значительнее, чем мельче фракция и, соответственно, снижается степень водопоглощения – один из основных критериев эффективности увлажняющего агента. Частично эти проблемы могут быть решены улучшением гранулометрического состава путем отсева мелких фракций (менее 0,63).

Таким образом, оптимальная концентрация пористого заполнителя зависит не от того, какое количество воды в нем может быть зарезервировано, а от того, в каком объеме и как эффективно она будет использована. В свою очередь, этот процесс зависит не только от вида заполнителя, но и от проницаемости, а также от сорбционных свойств цементного камня.

Водопоглощение, обусловленное сорбцией воды порами цементного камня, можно оценить при помощи модели, представленной на рисунке 4а. Предположим, что два сообщающихся цилиндрических капилляра с радиусами r и R являются репрезентативными характеристиками капиллярных пор соответственно цементного камня и увлажняющего агента. На начальном этапе гидратации, пока пористость цементного камня замкнута, количество воды, мигрирующей за счет разности капиллярных давлений, определяется смещением на вели-

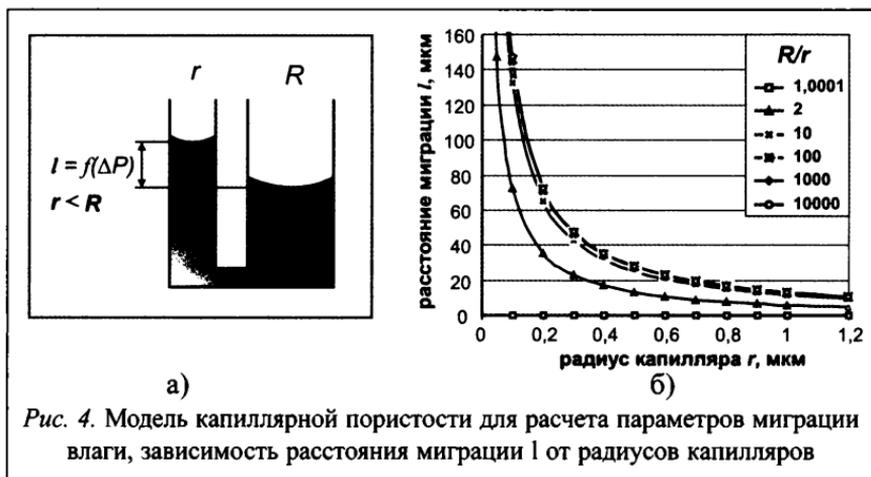
чину l уровней менисков. При этом разность капиллярных давлений ΔP должна уравниваться давлением столба жидкости высотой l , то есть:

$$\Delta P = \rho g l . \quad (1)$$

Учитывая, что $\Delta P = \frac{2\gamma_{12}}{r} - \frac{2\gamma_{12}}{R}$, получим:

$$l = \frac{2\gamma_{12}}{\rho g} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

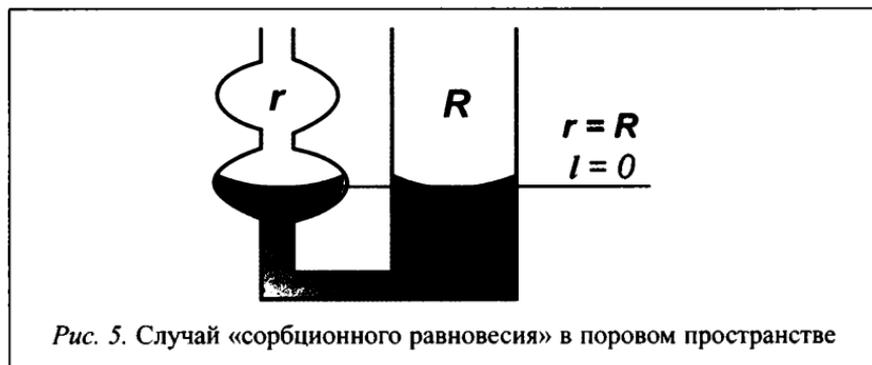
где: γ_{12} – поверхностное натяжение на границе «жидкость-пар», Н/м;
 ρ – плотность воды, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 r – меньший радиус капилляра с мениском;
 R – больший радиус капилляра с мениском.



Как видно из результатов расчета (рис. 4 б), полученных с использованием зависимости (2), величина l обратно пропорциональна радиусу r , а при соотношении $R/r \geq 100$ незначительно зависит от величины R .

Теоретически цементный камень, располагаемый на расстоянии большем, чем l от поверхности пористой гранулы, будет недоступен для мигрирующей воды. Исходя из этого, концентрацию и гранулометрию легкого заполнителя необходимо подбирать такими, чтобы наибольшее расстояние между поверхностями отдельных гранул не превышало $2l$.

Следует отметить, что в реальной структуре цементного камня встречаются случаи, в которых теоретические выводы, полученные на простых моделях, не находят подтверждения. Например, если изменить форму капилляра, как это показано на рис. 5, то согласно сорбционной теории миграция влаги при определенных условиях окажется невозможной из-за отсутствия разности капиллярных давлений.



В этой ситуации возникает вопрос о том, насколько корректно использовать в расчетах усредненные характеристики радиусов пор, а также допущения, касающиеся строго цилиндрической формы капилляров. Ответ на поставленный вопрос дает сравнительный анализ дифференциальных кривых пористости цементного камня и увлажняющего агента.

В случае, представленном на рис. 6, в состоянии «сорбционного равновесия» могут (но не обязательно будут) находиться поры в количестве, равном площади заштрихованной области. Остальные поры, пока они сообщаются, доступны для заполнения водой за счет разности капиллярных потенциалов.

Таким образом, вклад нехарактерных случаев в общую картину процесса миграции может быть оценен с достаточной точностью и при необходимости учтен в расчете состава и прогнозировании свойств бетона. При этом использование эквивалентных радиусов не противоречит физическому смыслу решаемой задачи и не исключает из рассмотрения все возможные случаи капиллярных взаимодействий, если их рассчитывать с учетом обезвоживания пор (на отрезках $[r_x; r_{max}]$ для цементного камня и $[R_x; R_{max}]$ для заполнителя, см. рис.6).

В работе [13], посвященной определению обобщенных характеристик пористости, была предложена зависимость для расчета эквивалентного квадрата радиуса, которая при использовании в решении задач проницаемости [11] показала хорошую сходимость результатов расчетов с опытными данными. Адаптированная к определению

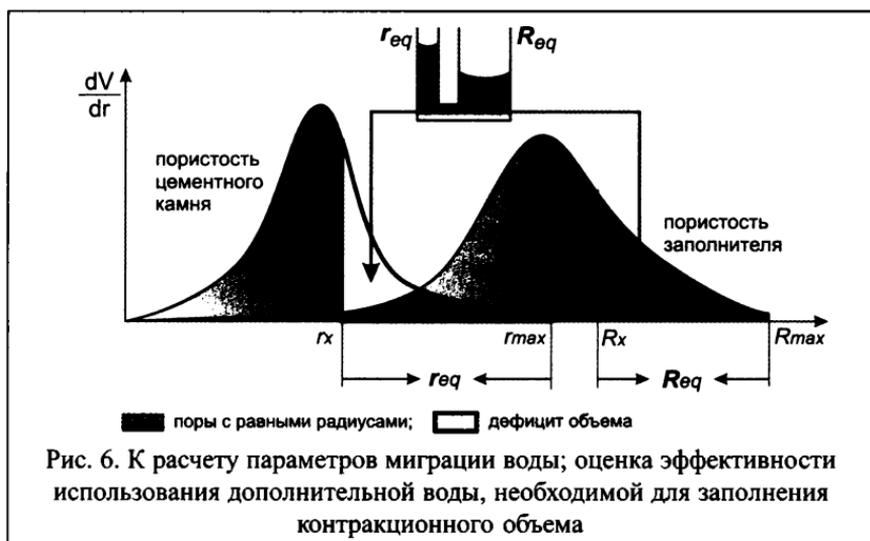


Рис. 6. К расчету параметров миграции воды; оценка эффективности использования дополнительной воды, необходимой для заполнения контракционного объема

эквивалентных радиусов обезвоженных пор, эта зависимость может быть использована в виде:

$$r_{eq}^2 = \left(\int_{r_x}^{r_{max}} \frac{dV}{d \log r} \cdot r^2 \cdot d \log r \right) / \left(\int_{r_x}^{r_{max}} \frac{dV}{d \log r} \cdot d \log r \right) \quad (3)$$

Важным параметром проницаемости для напрягающего бетона, помимо глубины миграции влаги, является скорость движения воды в порах. С точки зрения кинетики химических взаимодействий скорость миграции резервируемой воды не должна быть меньше скорости ее потребления на образование этtringита, гидросиликатов и других соединений. Несвоевременное обеспечение реагирующей сульфoалюминатной цементной системы водой, как правило, снижает скорость и вероятность кристаллизации этtringита, что на фоне интенсивного набора прочности наносит непоправимый ущерб деформациям расширения.

Известно, что скорость движения жидкости в капилляре определяется ее реологическими характеристиками. Движение ньютоновской жидкости описывается зависимостью:

$$\tau = \eta \frac{d\vartheta}{dr} \quad (4)$$

где: τ – напряжения сдвига, возникающие при движении соседних слоев жидкости с различной скоростью;

η – динамическая вязкость воды,

$Pa \cdot c; d\mathcal{G}/dr$ – градиент скорости движения жидкости.

$$d\mathcal{G}/dr = 4\mathcal{G}/r \quad \text{Согласно [14].}$$

На участке капилляра радиусом r и длиной l , где движение обусловлено разностью капиллярных давлений ΔP , ламинарное течение жидкости может быть описано уравнением равновесия между движущими капиллярными силами и противодействующими силами трения [14]:

$$\pi r^2 \cdot \Delta P = 2\pi r l \cdot \tau, \quad (5)$$

При этом скорость течения жидкости, согласно зависимости, полученной из ф. (5) с учетом ф. (4), прямо пропорциональна квадрату радиуса капилляра (рис.7):

$$\mathcal{G} = r^2 \cdot \frac{\rho g}{4\eta}. \quad (6)$$

Для сравнительного анализа скоростей притока воды и расхода ее на гидратацию необходимо определить объемные скорости потоков мигрирующей воды и воды, расходуемой на гидратацию.

Скорость потока мигрирующей воды получим, интегрируя произведение градиента линейной скорости на дифференциальный объем обезвоженных пор (рис. 7):

$$\mathcal{G}_{w,aggr} = \int_{r_x}^{r_{max}} \frac{d\mathcal{G}}{dr} \cdot \frac{dV}{dr} \cdot dr \quad (7)$$

Аппроксимируя дифференциальную кривую распределения пористости цементного камня функцией, предложенной Маскава К. и др. [15] –, и с учетом ф. (4), ф. (6), получим:

$$\mathcal{G}_{w,aggr} = B \cdot \frac{\rho g}{2\eta} \cdot \int_{r_x}^{r_{max}} r \cdot \exp(-Br) \cdot dr \quad (8)$$

где B – параметр распределения [15].

Скорость расхода воды на гидратацию, согласно гидратационной модели [8]:

$$\mathcal{G}_{w,cem} = \varepsilon_{ch,tot} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (9)$$

где: $\varepsilon_{ch,tot}$ – общая химическая усадка цементного камня, м³;

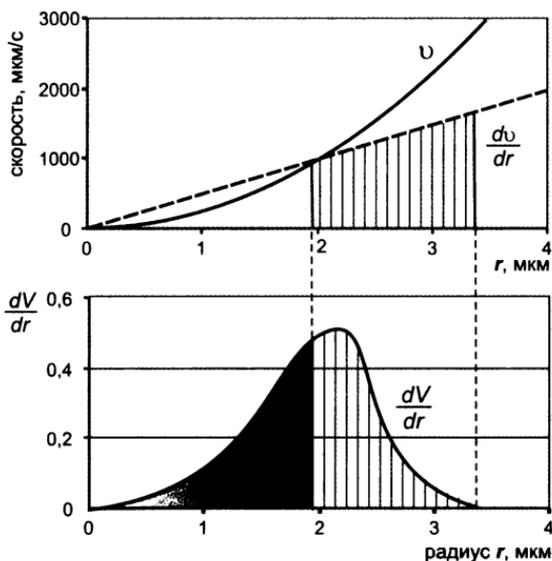


Рис. 7. К расчету объемной скорости потока мигрирующей воды

$d\alpha/dt$ – скорость гидратации [8].

Если $\vartheta_{w,agg} < \vartheta_{w,cem}$, необходимо уменьшить расстояние миграции воды l , изменяя концентрацию увлажняющего агента или корректируя его гранулометрический состав. С учетом скорости гидратации расстояние l следует рассчитывать по формуле:

$$l = \frac{3\gamma_{12}}{2\eta} \cdot \frac{r^2}{\vartheta_{w,cem}} \cdot \left(\frac{l}{r} - \frac{l}{R} \right), \quad (10)$$

Далее расчет состава бетона с учетом толщины прослойки l цементного камня на поверхности заполнителя сводится к решению геометрической задачи. Для идеализированных монофракционных геометрических моделей эти решения просты, но не всегда корректны по отношению к реальной структуре с полифракционным заполнителем. Здесь находят применения более сложные геометрические модели, позволяющие имитировать случайную упаковку гранул с учетом их концентрации и фракционного состава [16].

В работе [4] для оценки однородности распределения резервируемой воды в структуре бетона с заполнителем произвольного гранулометрического состава использовали модель-симулятор типа «матрица-включение» HCSS (от англ. hard core/soft shell). На примере

структуры с 70% заполнителя (по объему), где 20% заменены пористыми гранулами, было получено объемное распределение цементного камня в зависимости от расстояния от поверхности пористых гранул, насыщенных водой. Компьютерный анализ показал, что в исследуемых образцах почти 100% цементного камня находятся в пределах 1 мм от поверхности, 56% – в пределах 0,2 мм и т.д.

Каждое из анализируемых расстояний имеет особое значение в миграции воды на разных этапах твердения. Со временем, когда структура цементного камня уплотняется, все меньший его объем остается доступным для увлажнения, и, несмотря на возрастающую разность в размерах пор (поры цементного камня, в отличие от заполнителя, уменьшаются), параметр l уже не может служить однозначным критерием для оценки и регулирования однородности распределения в структуре дополнительной воды.

Преобразование сообщающихся капилляров в замкнутые поры является предметом исследований из области теории перколяции [17]. На базе компьютерных моделей-симуляторов с помощью перколяционной теории возможно прогнозирование степени гидратации, при которой произойдет переход непрерывной поровой структуры в дискретную среду в любом интересующем объеме цементного камня: это может быть микрообъем, измеряемый микронами расстояния от поверхности заполнителя, или макрообъем, позволяющий оценить общую проницаемость бетона в интересующий момент времени.

Теория перколяции предоставляет в распоряжение исследователей большой выбор алгоритмов оценки однородности среды. Перколяция может быть точечной или линейной, может рассматриваться в n -мерном пространстве и при самых разнообразных упаковках дискретных частиц. Общеизвестно, что этот математический аппарат служит надежным инструментом при анализе параметров проницаемости структуры любого материала, и его привлечение к разработке методов подбора состава бетона с позиций концепции внутреннего увлажнения позволит уточнить технологические рекомендации, касающиеся гранулометрии и концентрации увлажняющего агента.

Следует отметить, что подобные математические решения, а также представленные выше примеры расчета параметров структуры с использованием различных моделей служат разработке теоретически обоснованных методик подбора состава бетона, учитывающих закономерности физико-химических процессов твердения.

Принимая во внимание то, что для современных бетонов – сложных

модифицированных систем, традиционные расчетно-экспериментальные методы, оперирующие общими технологическими параметрами смесей, не удовлетворяют современным потребностям в управлении такими свойствами бетона, как собственные деформации, проницаемость, стойкость и прочее, эксплуатационные характеристики, развитие теории структурообразования цементных систем с привлечением точных наук и различных методов моделирования является мерой необходимой и направленной не на усложнение расчетных методик проектирования составов, а на их осмысленное упрощение и уточнение.

Заключение

При неравномерном увлажнении напрягающего бетона наблюдается неоднородность объемных деформаций, обусловленная не только развитием капиллярной усадки, но и неоднородным проявлением химического ресурса расширяющегося вяжущего, поскольку количество воды в структуре является прямым фактором, регулирующим кинетику растворения минералов цемента и кристаллизации этtringита. Концепция внутреннего увлажнения позволяет резервировать воду, необходимую для гидратации, равномерно во всем объеме структуры, и тем самым минимизировать деформации аутогенной усадки, а также значительно улучшить условия для кристаллизации этtringита и гидросиликатов, не нарушая кинетики этих процессов.

Поскольку замена части тяжелого заполнителя на легкий снижает механические характеристики бетона, при расчете количества легкого заполнителя необходимо принимать во внимание не только его форму, гранулометрический состав, параметры сорбции/десорбции, но и механические свойства (прочность, жесткость).

При расчете концентрации увлажняющего агента и при прогнозировании однородности распределения дополнительной воды в структуре цементного камня значимыми критериями являются:

- расстояние миграции воды l , обусловленное разностью капиллярных давлений, а также изменением относительной влажности в поровом пространстве цементного камня;
- объемная скорость миграции воды, лимитирующая кинетику гидратации;
- перколяция пористости в процессе твердения.

Все эти критерии необходимо оценивать только при совместном рассмотрении дифференциальных кривых пористости цементного камня и заполнителя. Такой подход позволяет определять, насколько эффективно используется вода, резервируемая в порах увлажняющего агента, и корректировать расход увлажняющего агента с учетом

той части воды, которая может остаться незадействованной в процессе миграции. Кроме того, использование дифференциальных кривых пористости цементного камня, полученных при моделировании процессов структурообразования во времени с привлечением перколяционной теории, дает возможность прогнозировать продолжительность внутреннего увлажнения, а также, подбирая необходимые параметры увлажняющего агента, управлять скоростью этого процесса с учетом кинетики гидратации.

Эффективные методы прогнозирования оптимальных составов бетона, позволяющие управлять свойствами структуры с позиций концепции внутреннего увлажнения, следует разрабатывать с привлечением комплексных моделей-симуляторов структуры цементного камня и бетона.

Список использованных источников

1. Тур В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительно напряженных конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 246 с.
2. D.P. Bentz, K.A. Snyder. Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-8621.
3. R. Philleo, Concrete science and reality. in: J.P. Skalny, S. Mindess (Eds.), Materials Science of Concrete II, American Ceramic Society, Westerville, OH 1991, pp. 1–8.
4. D.P. Bentz, P. Lura, J.W. Roberts. Mixture Proportioning for Internal Curing // Concrete International, 2005, Vol. 27, No. 2, pp. 35–40.
5. Kovler K., Souslikov A., Bentur A. Pre-Soaked Lightweight Aggregates as Additives for Internal Curing of High-Strength Concretes // Cement, Concrete, and Aggregates. – Dec. 2004, Vol. 26, No. 2.
6. Кравченко В.В., Филимонова Н. В. Перспективы применения метода внутреннего увлажнения для регулирования собственных деформаций цементных систем // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2007 г. – №1, с. 64–69.
7. Lura P., Bentz D., Lange D., Kovler K., Bentur A., K. van Breugel. Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste // Engineering Conferences International. Copper Mountain, CO, August 10-14, 2003, 89–99 pp., 2003.
8. Филимонова Н. В., Тур В. В. Приложения к расчету базовых параметров обобщенной модели расширяющейся цементной системы // Вестник БГТУ. Архитектура и строительство. – 2006 г. – №1.
9. Тур В. В., Филимонова Н. В. Обобщенная модель собственных деформаций расширяющейся цементной системы / Строительная наука и техника. №1. Мн. – 2006 г.
10. Тур В. В., Филимонова Н. В. Моделирование структуры и свойств

расширяющихся цементных систем // *Материалы XIV Международного научно-практического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь».* – Мн.– 2006 г.

11. S. Weber. Curing of high strength concrete using lightweight aggregates. *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen/Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt.* 1999.

12. A. Pflingstner, Porenstruktur von Beton. Bestimmung von Porenparametern anhand des Eindringverhaltens von n-Decan /*Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen/Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt.* 1999.

13. Reinhardt H.W., Gaber K. Equivalent pore size characterising the pore size distribution of cement mortar. *Ceramic Transactions, Vol.16, ed. S. Mindess, Am. Ceram. Soc., Westerville 1991, pp 319–335.*

14. M. Kryl. Studium technologii strunobetonu trwale prasowanego. Lublin: Wzdownictwa Uczelniane, – 1987, – 149 с.

15. Maekawa K., Ishida T., Kishi T. Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics. // *Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, vol. 1. – pp. 91–126.*

16. Разумейчик В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита // *Вестник БГТУ. Архитектура и строительство.* – 2006 г. – №1.

17. Winslow D. N., Cohen M. D., Bentz D. P., Snyder K.A., and Garboczi E. J. Percolation and Pore Structure in Mortars and Concrete // *Cement and Concrete Research, Vol. 24, 1994. – pp. 25–37.*