

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей
международной научной конференции,
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2018

Редакционная коллегия:

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

УДК 691.327

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ «ВНУТРЕННЕГО УВЛАЖНЕНИЯ»

В.В. Кравченко

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: valvik@hotmail.com

Представлены основные теоретические аспекты предлагаемой модели для прогнозирования объемной усадки и деформаций расширения цементных композитных систем в условиях «внутреннего увлажнения».

Ключевые слова: цементный камень, аутогенная усадка, внутреннее увлажнение, собственные деформации.

SIMULATION OF OWN DEFORMATIONS OF CEMENT COMPOSITE SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF "INTERNAL MOISTURE"

V. Kravchenko

Brest state technical university, Belarus

email: valvik@hotmail.com

The main theoretical aspects of the proposed model for predicting volumetric shrinkage and deformation of the expansion of cement composite systems under conditions of "internal moisture" are presented.

Keywords: cement stone, autogenous shrinkage, internal moistening, intrinsic deformations.

Введение. Развитие технологии тяжелого бетона долгое время было направлено, главным образом, на получение его высокой прочности при сжатии. Выражением нового взгляда на свойства бетонов можно считать изменение в терминологии, когда повсеместно в зарубежной и национальной технической литературе начали применять термин «высокоэффективный бетон» (англ. high performance concrete). Термин «высокоэффективный бетон» явился следствием необходимости придания бетону специальных конструктивно-технологических свойств, которые, как правило, не учитывались при проектировании составов традиционных бетонов.

Высокоэффективные бетоны помимо высокой прочности при сжатии, характеризуются высокой долговечностью и связанными с ней свойствами проницаемости и плотности. Наряду с очевидными преимуществами, такие бетоны обладают существенными недостатками, основным из которых является развитие усадочных деформаций, главным образом, аутогенной усадки. Физическая (воздушная) и аутогенная усадка являются главными источниками появления микротрещин в структуре бетона, обусловленных возникновением собственных напряжений, в случае, когда усадочные деформации развиваются в условиях ограничения. Аутогенная усадка является неотъемлемым свойством бетона, наибольший эффект которой проявляется в изолированных условиях, когда бетон не теряет влагу в окружающую среду, которая обусловлена изменением начального объема композита в результате протекания химических реакций гидратации (химическая усадка), приводящих

к уменьшению относительной влажности в поровой среде цементного камня (т.н. «само-высыхание», англ. self-desiccation) [1].

Механизм аутогенной усадки. В настоящее время в исследовательском сообществе существует предположение о трех основных причинах, вызывающих деформацию аутогенной усадки в цементном камне [1]: (а) возникновение и развитие капиллярного давления в порах цементного камня, (б) изменение поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня и (в) изменение расклинивающего давления адсорбированной воды, находящейся между частицами твердой фазы цементного камня.

Капиллярное давление p_c , действующее в поровой среде цементного камня может быть определено на основании закона Лапласа:

$$p_c = \frac{2 \cdot \gamma_{12} \cdot \cos \vartheta}{r_m}; r_m = r_c - \delta_{ads}, \quad (1)$$

где γ_{12} – поверхностное натяжение воды на границе раздела фаз «жидкость – газ»;

r_m – радиус мениска;

ϑ – краевой угол смачивания;

r_c – радиус капилляра с мениском;

δ_{ads} – толщина слоя адсорбированной воды на поверхности капилляра.

Изменение толщины слоя воды, адсорбированной на поверхности стенок капилляра приводит к изменению поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня. В работе [2] предложено учитывать изменение поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня на границе раздела фаз «твердое тело – жидкость» и «твердое тело – газ» через дополнительное давление, возникающее в поровой среде цементного камня, которое в свою очередь зависит от капиллярного давления, действующего в его поровой среде:

$$p_U = \int_{S_{w,p}} p_c \cdot dS, \quad (2)$$

где p_U – давление, возникающее в поровой среде при изменении поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня;

$S_{w,p}$ – степень насыщения пор влагой.

Проявление расклинивающего давления в поровой среде цементного камня наблюдается там, где расстояние между поверхностями частиц твердой фазы меньше чем в два раза общей толщины слоя воды, адсорбированной на их поверхностях [1]. В работе [3] значение расклинивающего давления p_π в поровой среде цементного камня предложено оценивать по следующей зависимости:

$$p_\pi = p_{\pi,0} \cdot \exp \left[- \frac{2 \cdot \delta_{ads}}{\lambda} \right], \quad (3)$$

где $p_{\pi,0}$ – номинальное расклинивающее давление;

λ – расстояние между частицами твердой фазы цементного камня, при котором проявляется наибольшее действие расклинивающего давления.

Как видно, представленные зависимости (1), (2) и (3) являются функциями двух основных аргументов – радиуса капилляра с мениском r_c и толщины слоя воды, адсорбированной на поверхности стенок капилляров δ_{ads} . На основании положений классической теории термодинамики используя физические законы Рауля и Кельвина, можно получить уравнение для определения радиуса мениска:

$$\ln\left(\frac{RH}{a_w}\right) = -\frac{2 \cdot \gamma_{12} \cdot M_w}{r_m \cdot \rho_w \cdot R \cdot T}, \quad (4)$$

где RH – относительная влажность поровой среды цементного камня;
 a_w – активность воды в поровом растворе;
 M_w – молярная масса воды;
 ρ_w – плотность воды;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – температура в поровой среде цементного камня.

Толщина слоя адсорбированной воды зависит от значения относительной влажности в поровой среде цементного камня. Толщина слоя адсорбированной воды может быть рассчитана на основе положений теории полимолекулярной адсорбции в зависимости от относительной влажности поровой среды, в соответствии с [4]:

$$\delta_{ads} = \frac{5,25 \cdot 10^{-9} \cdot RH}{\left(1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}} + 15 \cdot RH\right)}, \quad (5)$$

где $RH_{S_{w,p}=1}$ – относительная влажность, соответствующая полностью насыщенным влагой порам.

Из анализа зависимостей (1)-(5), можно сделать вывод о том, что основным фактором, оказывающим влияние на аутогенную усадку является значение относительной влажности в поровой среде цементного камня, уменьшение которой приводит к увеличению значения каждой ранее рассмотренной компоненты давления, действующего в поровой среде, что в свою очередь соответственно приводит к увеличению значения аутогенной усадки. Развитие химической усадки в цементном камне сопровождается постепенным уменьшением относительной влажности в его поровой структуре, которое принято называть «самовысыханием» (англ. – self-desiccation) [1].

Концепция «внутреннего увлажнения». В соответствии с терминологией ACI Committee 308 под «внутренним увлажнением» (англ. – internal curing) подразумевается процесс, при котором гидратация цемента происходит с участием дополнительной воды, доступной для реакций гидратации, но не являющейся частью воды затворения [5]. В рамках концепции «внутреннего увлажнения» требуемое количество дополнительной воды резервируется в специальном компоненте, который служит в качестве так называемого «увлажняющего агента». При изготовлении бетонной смеси «увлажняющий агент» распределяется в ее структуре, создавая таким образом внутренний источник воды, которая затем в процессе твердения бетона активно мигрирует в его поровую среду, заполняя водой образующиеся обезвоженные поры.

Предпосылки и допущения многоуровневой модели цементного композита. При разработке положений модели для прогнозирования собственных деформаций цементных

композитных систем приняты следующие предпосылки и не противоречащие им допущения:

1. Структура цементной композитной системы рассматривается на следующих элементарных гетерогенных уровнях: уровень 1 (уровень цементного камня), состоящий из твердой фазы, образованной продуктами гидратации, и капиллярной пористости, характерный размер фаз уровня выражается в мкм; уровень 2 (уровень цементной композитной матрицы), состоящий из цементного камня, транзитной зоны и гранул пористого заполнителя, характерный размер фаз уровня выражается в мм; уровень 3 (уровень бетонного композита), состоящий из композитной цементной матрицы, транзитной зоны и зерен плотного заполнителя, характерный размер фаз уровня выражается также в мм.

2. Цементная композитная система на каждом анализируемом является изотропной средой, развитие собственной деформации которой происходит равномерно во всех направлениях;

3. При моделировании собственных деформаций принимается, что цементная композитная система свободна от явлений, возникающих при приложении внешних воздействий.

4. Источником собственных деформаций в цементной композитной системе являются: (а) эффективное давление, действующее в ее поровой среде и (б) кристаллизационное давление этtringита, проявляющееся в процессе физико-химического расширения.

5. Источником внутреннего ограничения собственных деформаций цементной композитной системы является плотный заполнитель, формирующий жесткий каркас композита. Очевидно, что чем выше концентрация плотного заполнителя в цементной композитной системе и выше его жесткостные характеристики, тем больше степень ограничения, со стороны плотного заполнителя, развития свободных деформаций.

6. Развитие собственных деформаций цементной композитной системы при наличии ограничивающих связей (как внешних, так и внутренних) приводит к появлению в ней собственных, уравновешенных напряжений различного уровня.

7. В рамках предлагаемой модели развитие собственных деформаций рассматривается с учетом релаксации собственных напряжений в результате проявления упругой и пластической деформации.

8. При моделировании упругой и пластической деформации принято допущение, что пористый заполнитель, добавляемый в цементную композитную систему для предотвращения процесса «самовысыхания», не создает внутреннего ограничения, приводящего к возникновению собственных напряжений. Такое допущение обусловлено тем обстоятельством, что оптимальная концентрация пористого заполнителя, как правило, гораздо ниже, чем у плотного заполнителя. Вместе с тем, его влияние учитывается при моделировании собственных деформаций цементной композитной матрицы (уровень 2).

9. В данной работе собственные связанные деформации на уровне бетонного композита (уровень 3), в процессе его физико-химического расширения, определяют в условиях совместного действия внутреннего и внешнего ограничения, в виде цилиндрической оболочки, расположенной вокруг ядра композита.

Моделирование собственных деформаций цементного камня (уровень 1). В общем случае собственная деформация цементного камня ε_{kk}^{cm} является результатом совместного развития свободной деформации усадки $\varepsilon_{kk}^{cm,shr}$, физико-химического $\varepsilon_{kk}^{cm,ext}$ и температурно-

го расширения $\varepsilon_{kk}^{cm, id}$, значение которой может быть определено из принципа суперпозиции. Учитывая вязкоупругие свойства цементного геля, обусловленные его структурой, свободная деформация усадки цементного камня включает упругую и пластическую составляющую [6]:

$$\varepsilon_{kk}^{cm, e} + \varepsilon_{kk}^{cm, pl} = \int_{\tau_0}^{\tau} 3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{cm}^{ve}(\tau, \tau')) \cdot J_{cm}(\tau, \tau') \cdot \frac{d\sigma_0^{cm}(\tau')}{d\tau'} \cdot d\tau'; \quad (6)$$

где $\sigma_0^{cm}(\tau')$ – нормальное среднее напряжение в цементном камне в момент времени τ' ;
 $J_{cm}(\tau, \tau')$ – мера ползучести цементного камня в момент времени τ , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени τ' ;

$\nu_{cm}^{ve}(\tau, \tau')$ – коэффициент Пуассона цементной матрицы, обусловленный ее вязкоупругими свойствами, в момент времени τ , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени τ' ;

$[\tau_0, \tau]$ – рассматриваемый временной интервал.

Среднее нормальное напряжение в цементном камне основываясь на принятых предположениях и допущениях, определяют из условия равновесия при действии внутренних сил:

$$\sigma_0^{cm} = p_e \cdot \frac{\phi_c}{1 - \phi_c}, \quad (7)$$

где ϕ_c – относительный объем капиллярной пористости в цементной матрице;

p_e – эффективное давление, действующее в поровой среде цементного камня, определяемое из принципа суперпозиции всех компонент давления, действующих в его поровой среде:

$$p_e = -S_{w,p} \cdot p_c + p_U + p_{\pi} \cdot f_{\pi}, \quad (8)$$

где f_{π} – объемная доля капиллярной пористости, размер пор которой равен двойному значению толщины слоя воды, адсорбированной на их поверхности.

Деформация физико-химического расширения цементного камня в результате топомехимической реакции может быть определена на основе геометрической модели, в которой эффективное сферическое включение этtringита в единичной концентрации помещено в эффективную среду цементного камня. Эффективное сферическое включение этtringита состоит из сферической частицы клинкерного минерала СзА, вокруг которой располагается оболочка этtringита. Свободную деформацию цементного камня в процессе расширения этtringита, исходя из рассмотренной геометрической модели, определяют по следующей зависимости [7]:

$$\varepsilon_{kk}^{cm, ext} = \left(\frac{3 \cdot K_p^{Aft} + 4 \cdot G_{cm,d}}{3 \cdot K_{cm,d} + 4 \cdot G_{cm,d}} \right) \cdot \varepsilon_{kk}^{Aft}, \quad (9)$$

где K_p^{Aft} – эффективный модуль объемных деформаций сферического включения этtringита;

$K_{cm,d}$ и $G_{cm,d}$ – эффективный объемный модуль и модуль сдвига цементного камня в ненасыщенном состоянии;

ε_{kk}^{Aft} – относительная объемная деформация расширения сферического включения этtringита, определяемая по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{kk}^{Aft} = k_v \cdot \left(1 - \left(1 - \alpha_{cl,C_3A}\right)^3\right) \cdot f_{Aft}, \quad (10)$$

где k_v – коэффициент увеличения объема этtringита при полной гидратации клинкерного минерала C_3A ;

α_{cl,C_3A} – степень гидратации клинкерного минерала C_3A ;

f_{Aft} – объемная доля сферического включения этtringита в цементном камне, принимаемая равной начальному относительному объему клинкерного минерала C_3A .

Относительную деформацию температурного расширения цементного камня определяют по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{kk}^{cm,td} = 3 \cdot \alpha_{cm} \cdot (T - T_0), \quad (11)$$

где α_c – коэффициент линейного температурного расширения цементного камня;

T и T_0 – соответственно фактическая и базовая температура среды.

Моделирование собственной деформации цементной композитной матрицы (уровень 2). Для прогнозирования собственных деформаций цементной композитной матрицы использована трехфазная модель композитной системы, состоящей из сферического включения, матрицы определенной толщины, в форме сферической оболочки, располагаемой вокруг включения и эффективной среды, при следующих допущениях: (а) контакты на границах раздела фаз, в процессе развития собственных деформаций, не разрушаются; (б) жесткостные характеристики цементной композитной системы остаются постоянными (неизменными) в процессе деформирования, независимо от появления в ней микротрещин и (в) заполнитель и транзитная зона, вокруг него, являются пассивными фазами, собственные деформации в которых отсутствуют.

Основываясь на ранее приведенных предпосылках к моделированию собственных деформаций и вышеуказанных допущениях, для трехфазной модели, включающей эффективное сферическое включение из пористого заполнителя и транзитной зоны, сферическую оболочку цементной матрицы, определенной толщины вокруг него, и эффективную среду, свободную собственную деформацию определяют по следующей зависимости [8]:

$$\varepsilon_{kk}^{cmc} = \frac{K_{cm} \cdot \varepsilon_{kk}^{cm} \cdot (1 - c_{inc}^{cmc}) \cdot (3 \cdot K_{inc}^{cmc} + 4 \cdot G_{cm})}{K_{cm} \cdot (3 \cdot K_{inc}^{cmc} + 4 \cdot G_{cm}) - 4 \cdot c_{inc}^{cmc} \cdot G_{cm} \cdot (K_{cm} - K_{inc}^{cmc})}, \quad (12)$$

где ε_{kk}^{cmc} – свободная относительная объемная деформация цементной композитной матрицы;

K_{inc}^{cmc} – объемный модуль эффективного включения, состоящего из пористого заполнителя и транзитной зоны;

c_{inc}^{cmc} – объемная концентрация эффективного включения, состоящего из пористого заполнителя и транзитной зоны, в цементной композитной матрице.

Моделирование собственной деформации бетонного композита (уровень 3). Оценивая собственную деформацию бетонного композита, в котором плотный заполнитель формируя жесткий каркас ограничивает свободную собственную деформацию цементной композитной матрицы, следует говорить о его связанной собственной деформации, значение которой в общем случае определяют следующей алгебраической суммой:

$$\varepsilon_{rr}^c = \varepsilon_{rr}^{cmc} + \varepsilon_{rr}^{c,e} + \varepsilon_{rr}^{c,pl}, \quad (13)$$

где ε_{rr}^c – относительная связанная деформация бетонного композита в радиальном направлении;

ε_{rr}^{cmc} – относительная свободная деформация цементной композитной матрицы в радиальном направлении;

$\varepsilon_{rr}^{c,e}$ и $\varepsilon_{rr}^{c,pl}$ – соответственно относительная упругая и пластическая деформация бетонного композита в радиальном направлении.

Для определения относительной упругой и пластической деформации бетонного композита используют дискретный метод, основанный на методе трапеций численного интегрирования. В соответствии с данным методом в каждом i -ом временном интервале, принадлежащим диапазону $[1, n]$, определяют соответствующее приращение упругой и пластической деформации [9]:

$$\left(\Delta\varepsilon_{rr}^{c,e}\right)_i + \left(\Delta\varepsilon_{rr}^{c,pl}\right)_i = J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2}) \cdot \left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_i + \sum_{j=1}^{i-1} \left(J_c(\tau_i, \tau_{j-1/2}) - J_c(\tau_{i-1}, \tau_{j-1/2})\right) \cdot \left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_j, \quad (14)$$

где $J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2})$ – мера ползучести бетонного композита в момент времени τ_i , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени $\tau_{i-1/2}$;

$\tau_{i-1/2}$ – момент времени, соответствующий середине i -го временного интервала.

Собственные напряжения в бетонном композите в i -ом временном интервале для случая внутреннего ограничения определяют исходя из его собственной связанной деформации и собственной свободной деформации цементной композитной матрицы, в случае внешнего ограничения через реакцию в ограничивающей связи, по следующим уравнениям:

$$\left(\Delta\varepsilon_{rr}^c\right)_i^{ir} = \left(\Delta\varepsilon_{rr}^{cmc}\right)_i - J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2}) \cdot \left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_i^{ir} - \sum_{j=1}^{i-1} \left[J_c(\tau_i, \tau_{j-1/2}) - J_c(\tau_{i-1}, \tau_{j-1/2})\right] \cdot \left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_j^{ir}; \quad (15)$$

$$\left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_i^{or} = \frac{\delta_{con}}{R_c} \cdot E_{con} \cdot \left(\Delta\varepsilon_{rr}^c\right)_i^{or}, \quad (16)$$

где $\left(\Delta\varepsilon_{rr}^c\right)_i^{ir}$ и $\left(\Delta\varepsilon_{rr}^c\right)_i^{or}$ – соответственно приращение относительной связанной деформации бетонного композита в радиальном направлении в i -ом временном интервале, в условиях внутреннего и внешнего ограничения;

$\left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_i^{ir}$ и $\left(\Delta\sigma_{rr}^c\right)_i^{or}$ – соответственно приращение радиального напряжения в бетонном композите в i -ом временном интервале, в условиях внутреннего и внешнего ограничения;

$\left(\Delta\varepsilon_{rr}^{cmc}\right)_i$ – приращение относительной свободной деформации цементной композитной матрицы в радиальном направлении в i -ом временном интервале;

R_c – радиус ядра бетонного композита;

δ_{con} – толщина внешней цилиндрической оболочки;

E_{con} – модуль упругости материала внешней цилиндрической оболочки при растяжении.

Связанную собственную деформацию бетонного композита в радиальном направлении в условиях внутреннего и внешнего ограничения, определяют как алгебраическую сумму приращений собственной деформации по всем временным интервалам $[1, n]$, учитывая при этом упругую радиальную деформацию, обусловленную действием результирующей

щего поля напряжений бетонного композита, от суммарной реакции в ограничивающих связях, к началу n -ого временного интервала:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr}^{c,ir} = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{rr}^c)^{ir} - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (\Delta \sigma_{rr}^c)^j}{E_c(\tau_{n-1})} \\ \varepsilon_{rr}^{c,or} = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{rr}^c)^{or} - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} [(\Delta \sigma_{rr}^c)^{or} + (\Delta \sigma_{rr}^c)^{ir}]^j}{E_c(\tau_{n-1})} \end{cases} \quad (17)$$

где $\varepsilon_{rr}^{c,or}$ – относительная связанная деформация бетонного композита в радиальном направлении в условиях внешнего ограничения.

Согласно теории солидификации структура бетонного композита в произвольный момент времени может быть представлена как совокупность зерен заполнителя и расположенных вокруг них определенного количества элементарных кластеров (слоев) твердой фазы цементного камня, образованных к рассматриваемому моменту времени. Каждый образованный кластер твердой фазы цементного камня можно рассматривать как отдельную внутреннюю связь бетонного композита, препятствующую развитию его деформаций. Рассматривая образование структуры бетонного композита по теории солидификации в контексте дискретного метода, следует, что в i -ом временном интервале, за счет приращения твердой фазы цементного камня, образуется k -ая внутренняя связь бетонного композита, где $k \in [1, m]$ и $m = n$ (рис. 1).

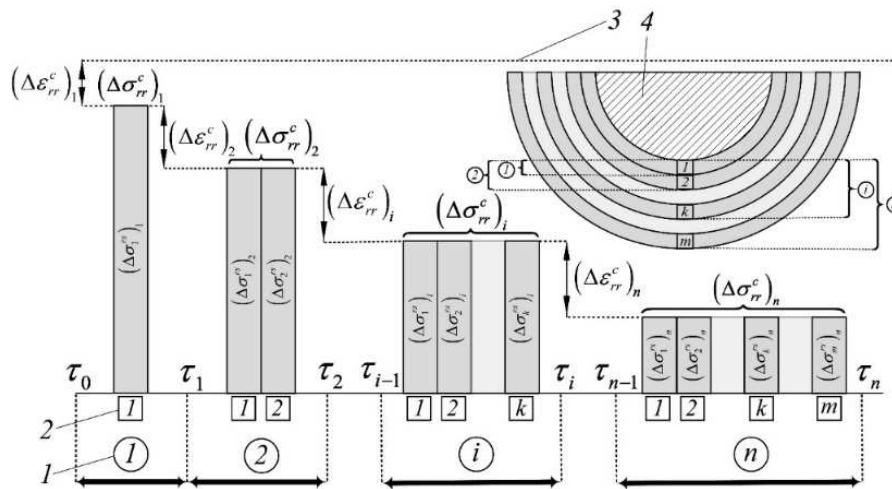


Рисунок 1. – Схема образования внутренних связей в бетонном композите, на основе портландцемента, в процессе твердения, согласно теории солидификации:

1 – временные интервалы; 2 – внутренние связи в бетонном композите; 3 – граница начального состояния бетонного композита; 4 – зерно заполнителя

Если в произвольный момент времени накопленный потенциал напряжений в отдельной связи бетонного композита превысит предельное значение, связь разрушится и ее жесткость станет равной нулю, соответственно общая жесткость бетонного композита уменьшится на величину жесткости разрушенной связи. Поэтому определять связанную деформацию бетонного композита в радиальном направлении в условиях внутреннего и внешнего ограничения, необходимо учитывая возможное разрушение внутренних связей

бетонного композита, принимая во внимание условие их разрушения. Условие разрушения отдельной связи можно представить в следующем виде:

$$\sum_{j=i}^n (\Delta\sigma_k^{rs})_j > \sigma_k^{tr}, \quad (18)$$

где $(\Delta\sigma_k^{rs})_j$ – приращение радиального напряжения в k -ой связи бетонного композита в j -ом временном интервале; σ_k^{tr} – предельное напряжение k -ой связи бетонного композита, при которой происходит ее разрушение.

Верификация предлагаемой модели. Верификация предложенной модели для определения собственных деформаций бетонного композита выполнена путем сравнения рассчитанных значений относительных собственных деформаций и опытных данных полученных в работах [10-14] и собственных исследованиях (рис. 2).

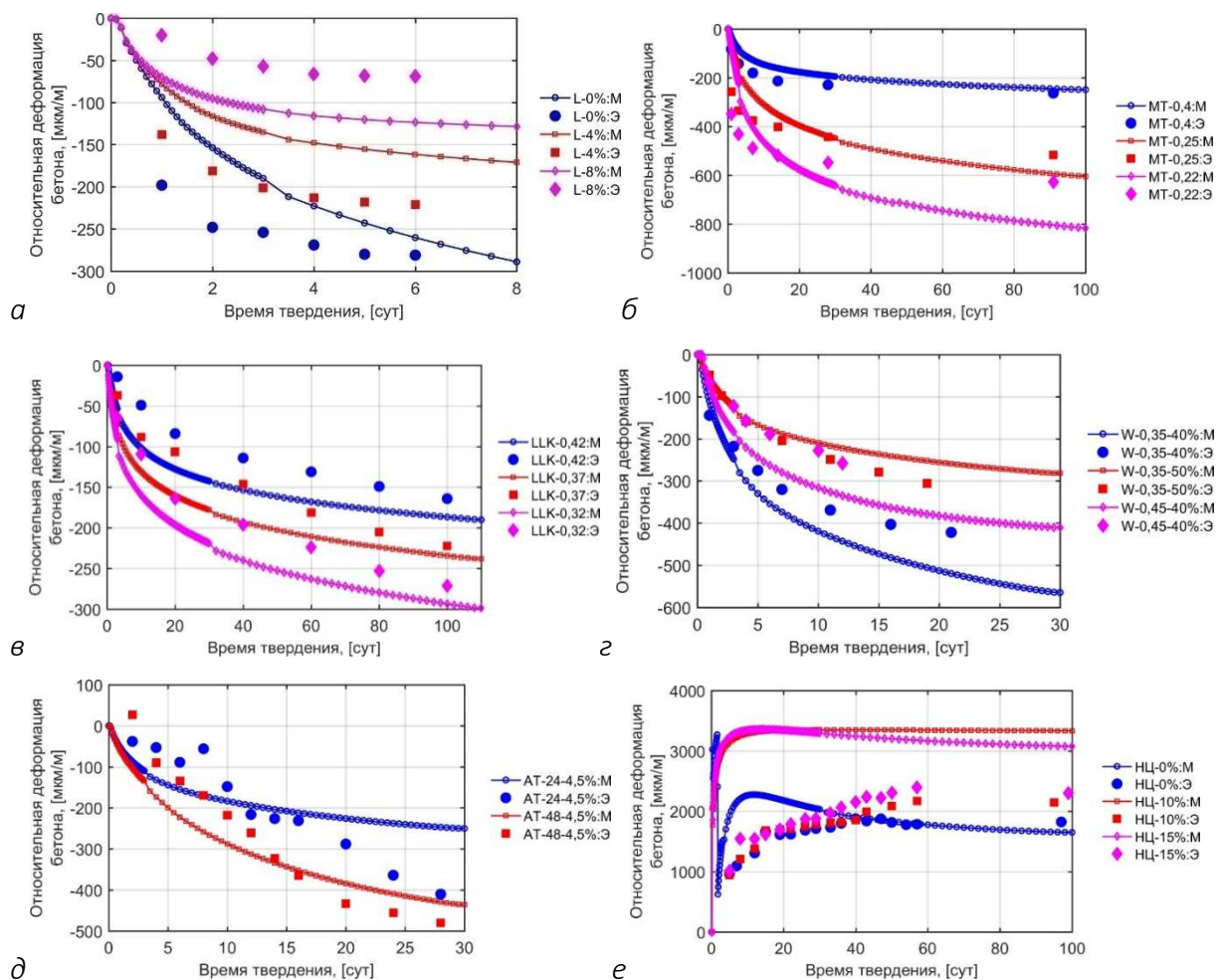


Рисунок 2. – Изменение относительной деформации бетона в процессе твердения по данным [10] (а), [11] (б), [12] (в), [13] (г), [14] (д) и собственных исследований (е):
 М – результаты, полученные по предлагаемой модели; Э – экспериментальные данные

Заключение. Предложена расчетная модель, позволяющая прогнозировать относительные деформации усадки и физико-химического расширения цементных композитных систем при низких водовяжущих отношениях, содержащих предварительно насыщенный пористый заполнитель в условиях «внутреннего увлажнения».

Для проверки достоверности прогнозируемых значений собственных деформаций цементных композитных систем, полученных по предлагаемой расчетной модели, была выполнена ее верификация на основе различных экспериментальных данных. Прогнозируемые и экспериментальные значения собственных деформаций показали удовлетворительную согласованность, подтверждающие справедливость принятых положений в рамках предлагаемой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lura, P. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms / P. Lura, O.M. Jensen, K. Van Breugel // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 2. – P. 223–232.
2. Coussy, O. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy, P. Dangla, T. Lassabatère, V. Baroghel-Bouny // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
3. Maruyama, I. Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure / I. Maruyama // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2010. – Vol. 8, iss. 2. – P. 187–200.
4. Hillerborg, A. A modified absorption theory / A. Hillerborg // *Cement and Concrete Research*. – 1985. – Vol. 15, iss. 5. – P. 809–816.
5. 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.
6. Hua, C. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I. Modelling at macroscopic scale / C. Hua, P. Acker, A. Ehrlicher // *Cement and Concrete Research*. – 1995. – Vol. 25, iss. 7. – P. 1457–1468.
7. Aboudi, J. *Mechanics of Composite Materials. A Generalized Multiscale Analysis Approach* / J. Aboudi, S.M. Arnold, B.A. Bednarczyk. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 984 p.
8. Xi, Y. Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multiscale effective homogeneous theory / Y. Xi, H.M. Jennings // *Materials and Structures*. – 1997. – Vol. 30. – P. 329–339.
9. Bazant, Z.P. Comparison of Approximate Linear Methods for Concrete Creep / Z.P. Bazant, L.J. Najjar // *Journal of the Structural Division*. – 1973. – Vol. 99, iss. 9. – P. 1851–1874.
10. Lura, P. *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete* / P. Lura. – Delft: Delft University Press, 2003. – 180 p.
11. Tazawa, E. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials / E. Tazawa, S. Miyazawa // *Magazine of Concrete Research*. – 1997. – Vol. 49, iss. 178. – P. 1–22.
12. Lee, K.M. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag / K.M. Lee, H.K. Lee, S.H. Lee, G.Y. Kim // *Cement and Concrete Research*. – 2006. – Vol. 36, iss. 7. – P. 1279–1285.
13. Wei, Y. Modeling of autogenous deformation in cementitious materials, restraining effect from aggregate, and moisture warping in slabs on grade: diss. ... Doctor of Philosophy / Y. Wei. – University of Michigan, 2008. – 160 p.
14. Akcay, B. Optimization of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete / B. Akcay, M.A. Tasdemir // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, iss. 1. – P. 353–363.