

Введение. Экспериментально-теоретическому исследованию усадки и ползучести бетона посвящено множество работ [1-7 и др.]. Однако, несмотря на обширные данные исследований, исчерпывающего объяснения природы ползучести до сих пор не существует. Поскольку нет общего объяснения природы ползучести, то нет и полностью обоснованной теории ползучести. Все существующие теории ползучести носят феноменологический характер и основаны на описании некоторых явлений, наиболее изученных экспериментально. В настоящей работе основное внимание уделяется не столько описанию механизма явления, сколько последствиям, им вызванным.

Состояние вопроса. Стоит отметить, что ползучесть бетона имеет как позитивную, так и негативную стороны. Положительный эффект заключается в том, что в результате ползучести снижается концентрация напряжений, вызванных усадкой, температурными колебаниями и др. структурными явлениями. С другой стороны, в некоторых видах конструкций ползучесть может угрожать их эксплуатационной надежности (особенно это актуально для высотных зданий, внецентренно нагруженных колонн и мостов). Так как максимальный интерес для автора представляет напрягающий бетон¹, то необходимо акцентировать внимание на том, что и на без того сложный процесс структурообразования (упрочнение с параллельно развивающейся усадкой) накладывается еще и процесс расширения. И если для обычных бетонов снижение вследствие ползучести напряжений, вызванных усадкой, частично носит позитивный характер, то для напрягающих бетонов, где самоупреждения являются основной энергетической характеристикой, влияние ползучести достаточно неоднозначно.

До сегодняшнего дня не существует четкой взаимосвязи между деформациями свободного и связанного расширения напрягающих бетонов. Так, для одной и той же марки напрягающего бетона по самоупреждению, получаемой в стандартных условиях, могут быть установлены различные значения деформаций свободного расширения к моменту стабилизации процесса, и наоборот. Экспериментально-теоретические исследования [8], выполненные с привлечением структурно-механических моделей расширяющегося композита, показали, что важнейшее значение при описании процесса самоупреждения имеет не конечное значение достигнутых свободных и связанных деформаций расширения, а кинетика их развития во времени в соотношении с кинетикой формирования жестких характеристик гидратирующей цементной системы, составляющей связующий каркас композита.

Для представленной на рис. 1 схемы деформаций и усилий, действующих в сечении конструкции на стадии самоупреждения, связанная деформация $d\varepsilon_s(t, \tau)$ представляет собой разность между деформацией свободного расширения $\alpha_{ex}(\tau)d\tau$ и упруго-пластической деформацией $d\varepsilon_c(t, \tau)$, вызванной действием самоупреждений в бетоне [9].

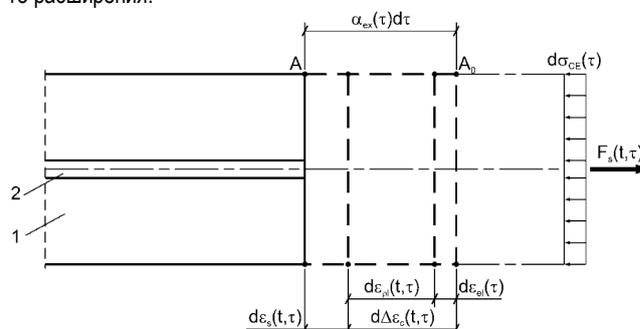
Для бесконечно малого приращения напряжений (самоупреждений) $d\sigma_{CE}(\tau)$ в момент времени τ ($0 < \tau < t$) полный вектор деформаций можно записать:

$$d\varepsilon(t, \tau) = d\varepsilon_\sigma(\tau) + d\varepsilon_c(t, \tau) + \alpha_{ex}(\tau)d\tau, \quad (1)$$

где $d\varepsilon_\sigma(\tau)$ – упругие деформации, вызванные действующими в момент времени τ самоупреждениями;

$d\varepsilon_c(t, \tau)$ – неупругие деформации быстро нарастающей ползучести, обусловленные вязко-пластическими свойствами композита в момент времени $t > \tau$;

$\alpha_{ex}(\tau)$ – скорость развития собственных деформаций свободного расширения.



1 – бетонный элемент; 2 – ограничивающая связь (например, арматурный стержень)

Рис. 1. К определению величины связанных деформаций при расширении напрягающего бетона в условиях ограничения [9]

Учитывая, что левая часть уравнения (1) представляет собой разность

$$\alpha_{ex}(\tau)d\tau - d\varepsilon_s(t, \tau) = d\Delta\varepsilon(t, \tau), \quad (2)$$

можно записать:

$$\alpha_{ex}(\tau)d\tau - d\varepsilon_s(t, \tau) = \frac{d\sigma(\tau)}{E_c(\tau)} + \frac{d\sigma(\tau)}{E_{c0}(\tau)} \varphi(t, \tau). \quad (3)$$

Правая часть уравнения (3) представляет собой упруго-пластическую деформацию бетона на стадии расширения. Учитывая, что все усилия относятся к категории внутренних и взаимно уравновешены, напряжения в бетоне могут быть выражены через связанные деформации ограничивающей связи. В частности, для случая арматурного ограничения, приращение самоупреждений может быть записано:

$$d\sigma_{CE}(\tau) = d\varepsilon_s(\tau) \cdot \rho_l \cdot E_s, \quad (4)$$

где ρ_l – коэффициент продольного армирования.

После преобразования с учетом ф. (4) зависимость для определения связанных деформаций (3) принимает вид:

$$d\varepsilon_s(t, \tau) = \left[\alpha_{ex}(\tau) - \left(\frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\varphi(t, \tau)}{E_{c0}(\tau)} \right) \frac{d\varepsilon_s(\tau)}{d\tau} \rho_l \cdot E_s \right] d\tau. \quad (5)$$

Тогда связанные деформации напрягающего бетона в любой произвольный момент времени на стадии расширения могут быть определены:

¹ Напрягающий бетон – бетон на основе напрягающего цемента, обладающий способностью при твердении увеличиваться в объеме и в условиях упруго-податливого ограничения развивать усилие самоупреждения

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \left[\alpha_{ex}(\tau) - \left(\frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\varphi(t, \tau)}{E_{c0}(\tau)} \right) \frac{d\varepsilon_s(\tau)}{d\tau} \right] \rho_l \cdot E_s \, d\tau, (6)$$

или, переходя к численному интегрированию (для n временных интервалов продолжительностью Δt) (см. рис. 2), получаем:

$$\varepsilon_s(i \cdot \Delta t) = \sum_{m=1}^i \left\{ \alpha_{ex}(m \cdot \Delta t) \Delta t - \left[\frac{1}{E_c(m \cdot \Delta t)} + \frac{\varphi(i \cdot \Delta t, m \cdot \Delta t)}{E_c(m \cdot \Delta t)} \right] \rho_l \cdot E_s \times \left[\varepsilon_s(m \cdot \Delta t) - \varepsilon_s((m-1) \cdot \Delta t) \right] \right\}, (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Выражение (7) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, из совместного решения которых могут быть определены связанные деформации $\varepsilon_s(t)$, и далее вычислены самонапряжения традиционным образом:

$$\sigma_{CE}(t) = \varepsilon_s(t) \cdot \rho_l \cdot E_s. (8)$$

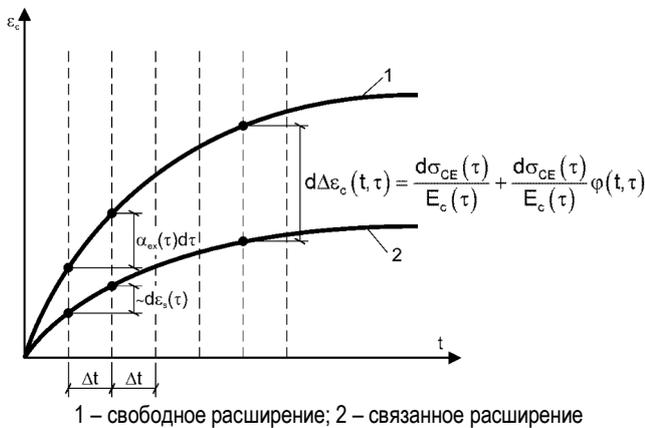


Рис. 2. К определению величины связанных деформаций напрягающего бетона на стадии расширения

Безусловно, что для решения уравнений (7) необходимо установить функцию, описывающую изменение коэффициента быстро нарастающей ползучести $\varphi(t, \tau)$ для напрягающего бетона в раннем возрасте, а также зависимость кинетики развития собственных свободных деформаций $\alpha_{ex}(t)$.

Необходимо отметить, что полученные уравнения универсальны: при отсутствии внешнего ограничения ($\rho_l = 0$) из (6) следует, что деформации элемента из напрягающего бетона равняются деформациям свободного расширения. Для случая бесконечно жесткого ограничения ($d\varepsilon(t, \tau) = 0$) решение для напряжений может быть получено из исходного уравнения (1).

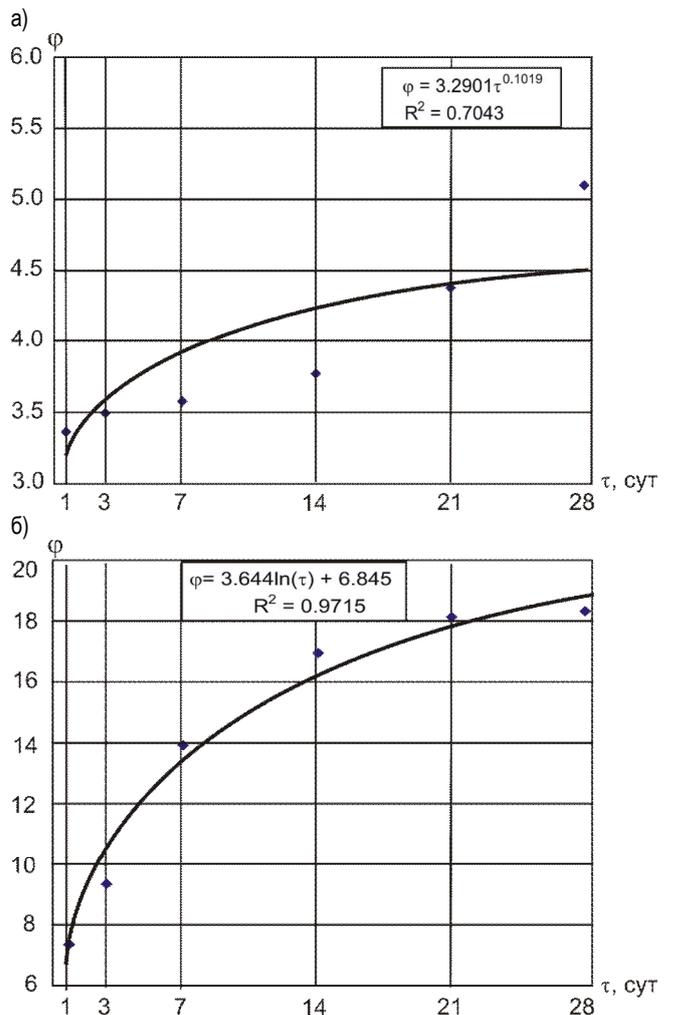
Зависимости, описывающие изменение коэффициента $\varphi(t, \tau)$ и скорости собственных деформаций $\alpha_{ex}(t)$, а также зависимости изменения модуля деформаций бетона $E_c(t)$ в раннем возрасте могут быть получены экспериментально. Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что для получения надежных функциональных зависимостей в опытах следует учесть достаточно большую группу факторов, оказывающих влияние как на процесс расширения, так и на процесс формирования ограничивающих связей.

Для анализа изменения коэффициента ползучести в раннем возрасте в зависимости от энергоактивности применяемого вяжущего был проанализирован ряд опытных данных, полученных в лаборатории самоупроченных конструкций при УО БрГТУ за период 1999–2008 гг. Были проанализированы более 90 составов различной энергоактивности от 1 до 4 МПа. Изменение коэффициента быстро

натекающей ползучести во времени для напрягающих цементов различных марок по самоупрочению представлено на рис. 3. Изменение коэффициента ползучести в момент стабилизации процесса расширения в зависимости от энергоактивности применяемого цемента представлено на рис. 4.

В связи с нехваткой экспериментальных данных, касающихся жесткостных характеристик исследуемых составов и их изменения во времени, модули упругости для анализируемой выборки были рассчитаны теоретически с использованием классических положений теории эффективной среды [8–13].

Как видно из рис. 3, максимальная кинетика роста коэффициента ползучести наблюдается в начальные сроки твердения, когда композитная система наиболее интенсивно гидратирует. При этом в зависимости от энергоактивности применяемых вяжущих значительно отличаются и сами величины коэффициента ползучести. Так, если для напрягающих цементов невысоких марок по самоупрочению, коэффициент быстро натекающей ползучести находится в интервале 3..6 в зависимости от возраста бетона, то для цементов с энергией самоупрочения 4 МПа и выше аналогичный коэффициент варьируется в широких пределах от 20 до 90. Это подтверждает предположение о том, что чем выше энергия расширения вяжущего, тем больше в общих деформациях системы занимают пластические деформации. На рис. 4 представлено изменение коэффициента ползучести к моменту стабилизации расширения (в данном случае с обоснованным запасом принят возраст 28 сут.) в зависимости от энергоактивности применяемого цемента. Увеличение энергоактивности цемента в 2 раза приводит к возрастанию коэффициента ползучести более чем на порядок.



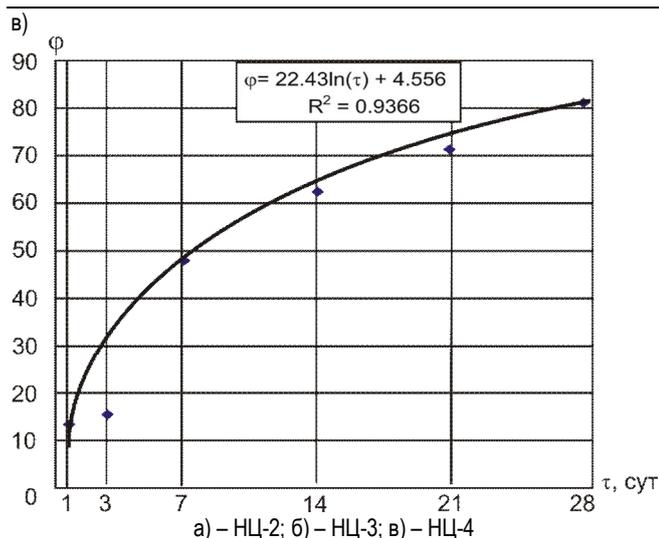


Рис. 3. Изменение коэффициента ползучести во времени для цементов различной энергоактивности в раннем возрасте

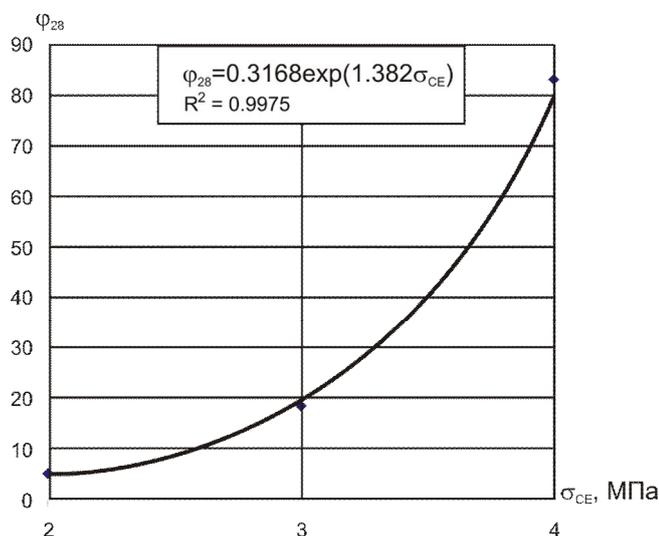


Рис. 4. Изменение коэффициента ползучести ϕ в раннем возрасте в зависимости от энергоактивности применяемого цемента ($\tau = 28$ сут.)

Заключение. Анализируя факторы, определяющие быстро протекающую ползучесть, необходимо должное внимание уделять энергоактивности напрягающего цемента, значительно влияющей на коэффициент ползучести, и, как следствие, на итоговое соотношение свободных и связанных деформаций, что, в свою очередь, показывает, насколько полно реализована энергия расширения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ахвердов, И.Н. Механизм усадки и ползучести бетона в свете современных представлений реологии и физики твердого тела. // Бетон и железобетон. – 1970. – № 10. – С. 21–23.
2. Берг, О.Я. К учету нелинейной связи напряжений и деформаций ползучести бетона в инженерных расчетах. // Изв. вузов. Строительство и архитектура / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков – 1973. – № 12. – С.14–21.
3. Циолосани, З.Н. О природе деформирования бетона и железобетона // Бетон и железобетон. – 1979. – № 2. – С. 28–29.
4. Bazant Z.P., Huggaard A.B., Baweja S., Ulm Franz-Josef "Micro-prestress-Solidification Theory for Concrete Creep I: Aging and Drying Effects, Journal of Engineering Mechanics", Vol. 123, November 1997. – P.1188–1194
5. Gamble B.R., Parrott L.J. Creep of concrete in compression during drying and wetting // Mag. Concr. Res. – 1978. №104. – P.129–138.
6. Hashin Z., Shtrikman S. Variational approach to the theory of elastic behavior of multi-phase materials. J. Appl. Phys., 33 – 3125 p.
7. RILEM Model B3 (1995) Creep and shrinkage model for analysis and design of concrete structures - model B3, draft RILEM Recommendation, prepared by Bazant, Z.P. and Baweja, S., Materials and Structures, Vol. 28, pp. 357-365, 415-430, 488-495, with Errata in Vol. 29 (1996), pp. 126.
8. Павлова, И.П. Приложение теории эффективной среды к моделированию жесткостных характеристик бетонного композита // Строительная наука и техника / И.П. Павлова, В.В. Тур – Минск, 2005. – № 3. – С. 3–8.
9. Тур, В.В. Самонапряженный железобетон: исследование, опыт и перспективы применения // Строительная наука и техника. – № 1. – Мн., 2005. – С. 62–69.
10. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: монография / В.В. Тур, Н.А. Рак – Брест: БГТУ, 2004. – 252 с.
11. Garboczi E. J., Berryman J. G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations // Mechanics of Materials, 2001. – P. 455–470.
12. Hashin Z. Elastic moduli of heterogeneous materials. J. Appl. Mech., 29 – P. 143–150.

02.12.09

PAVLOVA I.P. Influence of self-stressing cement activity on early-age creep coefficient variation

In present paper experimental-theoretical research of self-stressed concrete early-age phenomena are presented. Influence of self-stressing cement activity are viewed in moment of structure formation both with moment of expansive process stabilizaton. Calculation of structure elastic characteristics are proposed on the basis of Effective Medium Theory.

691.544

Введение. Несмотря на то, что XXI век для многих отраслей стал веком активного внедрения наукоемких технологий, развитием технологии отечественных модифицированных бетонов по-прежнему движет практический опыт, который в большинстве случаев с переменным успехом перенимается у зарубежных коллег, у-

вердившихся в этой области на лидирующих позициях. Пересмотреть подходы к освоению новых материалов не дает и современный строительный рынок, предлагающий продукты строительной химии в таком ассортименте, что потребителю, ориентированному на более или менее приличный результат, ничего не остается, как экспери-

Филимонова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.