

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С ПОЛИДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

**Павлова<sup>1</sup> И. П., Лизогуб<sup>2</sup> И. В., Лизогуб<sup>3</sup> А. А.**

*канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов  
УО «Брестский государственный технический университет»  
г. Брест, Республика Беларусь, pavlinna@tut.by*

*магистр техн. наук, старший преподаватель кафедры строительного производства  
УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»  
г. Гродно, Республика Беларусь, belahutaja-95@mail.ru*

*магистр. техн. наук, научный сотрудник НИЧ  
УО «Брестский государственный технический университет»  
г. Брест, Республика Беларусь, p\_332\_14lizogub@mail.ru*

Напрягающий бетон обладает способностью не только компенсировать усадочные деформации, но и получать регулируемое исходное напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, положительно влияющее на их эксплуатационные характеристики и долговечность. Напрягающий бетон наиболее полно реализует свои свойства в условиях ограничения. Подходы

к прогнозированию свойств напрягающего бетона не являются универсальными, поскольку основаны, как правило, на феноменологических методах и эмпирических зависимостях. Поэтому для сокращения временных и экономических затрат необходимо минимизировать возможные экспериментальные исследования, заменяя эмпирический подход аналитическим моделированием.

Выделяют два основных подхода к определению собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона в условиях ограничения. Первый – энергетический подход (теории В. В. Михайлова, Y. Tsuji), базирующийся на законе сохранения энергии. Энергия, которая при свободном расширении затрачивается на разрушение внутренних связей цементной матрицы, компенсируется работой арматуры на растяжение и бетона на сжатие [1, 2]. Данный подход позволяет выполнять расчеты, не устанавливая зависимости, описывающие кинетику развития свободных деформаций расширения во времени, изменение модуля упругости и функции ползучести напрягающего бетона в раннем возрасте, опираясь только на энергетическую марку бетона по самонапряжению. Однако энергетические модели не способны охватить все возможные варианты ограничения (несимметричное одностороннее армирование, абсолютно жесткое ограничение, свободное расширение и пр.) [3].

Наряду с энергетическими, широкое применение получили модели, базирующиеся на втором основном подходе, – деформационном. Такой подход рассматривает расширение на элементарных временных интервалах, на которых происходит приращение деформаций свободного расширения. Деформационные модели способны учитывать изменения физико-механических свойств материала, влияние ползучести в раннем возрасте и реакции, возникающей в упругом ограничении на очередных этапах прироста деформаций [4, 5]. Недостатком таких моделей является трудоемкость расчета ввиду большого количества входных параметров.

Известно, что модификация структуры бетона одновременным вводом расширяющейся добавки и фибры может значительно улучшить эксплуатационную надежность и повысить эффективность конструкций и сооружений [6–10]. Расширение такого бетона происходит в условиях обжатия дисперсными армирующими волокнами, в результате чего создается предварительное напряжение, которое почти полностью сохраняется и после стабилизации процесса. Ввиду хаотичного расположения волокон, формирующего объемный преднапряженный фиброкаркас [11], дисперсное армирование напрягающего бетона следует рассматривать как пространственное ограничение. Вследствие этого, прогнозирование деформаций и напряжений необходимо осуществлять, руководствуясь положениями деформационного подхода.

Модифицированная деформационная модель напрягающего фибробетона для случая трехосного ограничения основана на предпосылке о том, что данный материал может быть представлен в виде шара из расширяющегося бетонного ядра и покрывающей его однородной оболочки постоянной толщины, состоящей из материала фибры (рис. 1).

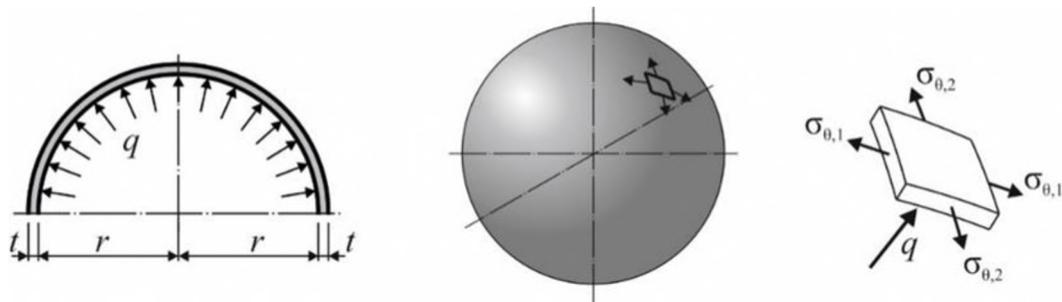


Рисунок 1 – Изображение сферической оболочки из фибры с возникающими в ней напряжениями  $\sigma_r$  и  $\sigma_m$  от действия радиальной равномерно распределенной нагрузки  $q$

В общем виде модель напрягающего фибробетона для случая трехосного ограничения в соответствии с [15] на произвольном  $i$ -м временном интервале может быть описана системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\Delta\sigma_{cf})_i = \frac{2t}{r} \cdot \frac{E_s}{1-\mu_s} \cdot (\Delta\varepsilon_r)_i; \\ (\Delta\varepsilon_r)_i = (\Delta\varepsilon_f)_i - (\Delta\sigma_{cf})_i \cdot (1-2\mu_c) \cdot J(\tau_{i+1/2}; \tau_i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ (\Delta\sigma_{cf})_j \cdot \frac{\Delta\phi(\tau_i; \tau_j)}{E_{cm,28}} \right]; \\ - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ \frac{(\Delta\sigma_{cf})_j}{E_{cm}(\tau_j)} \right] \cdot \frac{E_{cm,aw}(\tau_{(i-1)+1/2})}{E_{cm}(\tau_{(i-1)+1/2})}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Как видно из (1) результатом решения (откликом модели) являются собственные деформации  $\varepsilon_r$  и напряжения напрягающего фибробетона  $\sigma_{cf}$ , на которые влияет ряд геометрических, жесткостных, деформационных параметров, а также его возраст и температура.

Отношение  $t/r$  является геометрической характеристикой расчетной модели и согласно принятым допущениям [12] пропорционально расходу фибры на единицу объема бетона. Другими словами, данный параметр отражает объемное соотношение волокон фибры  $\rho_s$ .

Жесткостные характеристики модели, к которым относятся модуль упругости и коэффициент Пуассона, условно можно разделить на параметры напрягающего бетона ( $E_c, \mu_c$ ) и параметры материала фибры ( $E_s, \mu_s$ ) (в случае полиармирования – параметры  $n$  материалов ( $E_{s1}, \mu_{s1}, \dots, E_{sn}, \mu_{sn}$ )).

К деформационным характеристикам модели относится функция относительных деформаций свободного расширения во времени  $\varepsilon_f(\tau)$ , функции ползучести бетона  $J(\tau_{i+1/2}; \tau_j)$ .

Стоит отметить, что адекватное теоретическое описание процесса развития деформаций свободного расширения фибробетона во времени  $\varepsilon_f(\tau)$  и по сей день является фундаментальной проблемой физики и механики бетона. Поэтому в данных исследованиях используются нормализованные зависимости  $\varepsilon_f(\tau)$  для составов напрягающего бетона различной активности, полученные по результатам испытаний.

Важными характеристиками модели являются возраст  $\tau$  и температура  $T$  напрягающего фибробетона на стадии его твердения и расширения. Данные параметры учитываются при моделировании изменения модуля упругости и функции ползучести бетона во времени путем введения модифицированного возраста бетона  $\tau_i$ , который соотносится с  $\tau$  суткам реального возраста бетона и учитывает влияние температурного режима на стадии твердения и расширения бетона:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n \Delta\tau_j \cdot e^{13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta\tau_j)/T_0}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\tau_j$  – количество суток (дней) с температурой  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$ .

Модуль упругости бетона в модифицированном возрасте, соответствующем реальному возрасту бетона  $\tau_j$ , может быть получен:

$$E_c(\tau) = E_{cm,28} \cdot \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{\tau_{m,28} - a}{\tau_i - a} \right)^{0,5} \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $s$  – эмпирический коэффициент, учитывающий тип вяжущего;

$a$  – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние времени начала схватывания.

Коэффициент ползучести бетона  $\phi(t; t_0)$  рассчитывают по следующей формуле:

$$\phi(\tau; \tau_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(\tau; \tau_0), \quad (4)$$

где  $\phi_0$  – базовый коэффициент ползучести;

$\beta_c(\tau, \tau_0)$  – коэффициент, описывающий развитие ползучести во времени после нагружения.

$$\beta_c(\tau, \tau_0) = \frac{(\tau - \tau_0)}{\beta_H + (\tau - \tau_0)}, \quad (5)$$

$\beta_H$  – коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона [3, 6].

Проанализировав полученные результаты, были сформулированы следующие **выводы**:

1. Изменяя количество и вид расширяющейся добавки и варьируя коэффициент армирования, можно получить сталефибробетоны с регулируемым значением собственных деформаций.

2. Область эффективного использования стальных волокон с целью достижения эффекта «связывания» свободного расширения в напрягающем бетоне разной энергоактивности располагается в пределах значений от  $\rho_s = 0,38\%$  до  $\rho_s = 0,64\%$  (от 30 до 50 кг на  $1\text{ м}^3$  бетона).

3. Увеличение модуля упругости бетона приводит к сдерживанию развития свободных деформаций и созданию более благоприятного напряженно-деформированного состояния, что в итоге приводит к увеличению связанных деформаций по отношению к свободным при высоких модулях упругости. Наоборот, снижение модуля упругости, приводя к снижению общей жесткости композитной системы, в итоге не «препятствует» росту свободных деформаций при общем снижении величины связанных. В таких случаях для энергоактивных

бетонов, склонных к разуплотнению на стадии расширения и спадам прочности и модуля упругости, необходимо предусматривать дисперсное армирование по верхнему пределу ( $\rho_s = 0,64 \%$ ).

4. Изменение количества вводимой фибры приводит к разным эффектам в развитии связанных деформаций напрягающего бетона в разные временные интервалы. Увеличение процента фибры в бетоне приводит к снижению связанных деформаций, причем зависимость носит линейный характер до момента стабилизации расширения, когда в активно гидратирующей системе происходит перераспределение напряжений и фибра связывает систему, оказываясь химически преднапряженной. После стабилизации процесса расширения зависимость становится нелинейной и с увеличением  $\rho_s > 0,64 \%$  носит пологий характер. Дальнейшее увеличение количества фибры при стабилизировавшемся процессе расширения приводит только к увеличению пластической составляющей в структуре, что подтверждает сформулированные выше выводы об оптимальной области объемного содержания фибры в напрягающем бетоне разной активности, при которой ее свойства как ограничивающего элемента реализуются наиболее полно.

#### Список использованных источников

1. Михайлов В. В. Расширяющиеся и напрягающиеся цементы и самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер // М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.

2. Tsuji, Y. Methods of estimating chemical prestress and expansion distribution in expansive concrete subjected to uniaxial restraint / Y. Tsuji // Concrete Library of JSCE. – 1984. – №3. – p. 131–143.

3. Тур, В. В. Модели, применяемые для расчета связанных деформаций и самонапряжений в элементах из напрягающего бетона / В. В. Тур, О. С. Семенюк // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 1. – С. 53–69.

4. Ito, H. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete / H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato // Journal of Advanced Concrete Technology. 2004;(2). – pp. 155–174.

5. Semianiuk, V. Early age strains and self-stresses of Expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk, V. Tur, M. F. Herrador // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 131. – PP. 39–49.

6. Алексеев, В. А. Добавки с самостоятельной гидравлической активностью для набрызгбетона / В. А. Алексеев, Ю. М. Баженов, С. И. Баженова [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 61–63.

7. Елсуфьева, М.С. Оценка долгосрочного изменения свойств сталефибробетонов с расширяющими добавками / В. Г. Соловьев, А. Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 21–23.

8. He, H. A. Performance on steel fiber reinforced self-stressing concrete. *Key Engineering Materials* / H. A. He, B. X. Wang, J. T. Lin // Trans Tech Publications Ltd. 2009. – Vol. 400. – Pp. 427–432. – DOI:10.4028/www.scientific.net/kem.400-402.427.

9. Харченко, А.И. Применение расширяющихся цементов для набрызгбетона в тоннельном строительстве / А. И. Харченко, И. Я. Харченко, В. Я. Алексеев, С. И. Баженов // *Вестник МГСУ*. – 2019. – №11 – С. 1438–1448.

10. Sengul, O. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. – Vol. 186. – Pp. 1082–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.042.

11. Елсуфьева, М. С. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне / М. С. Елсуфьева, В. Г. Соловьев, А. Ф. Бурьянов // *Строительные материалы*. – 2014. – № 8. – С. 60–63.

12. Павлова, И. П. Собственные деформации напрягающего бетона с дисперсным армированием: часть 1. Моделирование / И. П. Павлова, И. В. Белкина // *Известия вузов. Строительство*. – 2022. – №9. – С. 5–17.