

И.П. ПАВЛОВА¹, И.В. БЕЛКИНА²¹УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь²УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА НА СТАДИИ РАСШИРЕНИЯ

Аннотация. Одним из главных преимуществ напрягающего бетона является его способность компенсировать один из основных недостатков, присущий минеральным вяжущим, – усадочные деформации. При этом подходы к прогнозированию свойств напрягающего бетона не являются универсальными, поскольку базируются в основном на феноменологических подходах и эмпирических зависимостях. Основными подходами к прогнозированию деформаций и напряжений, возникающих в расширяющемся бетоне, являются энергетический и деформационный. Ряд исследователей подтверждает эффективность применения деформационного подхода для определения собственных деформаций и напряжений. Модифицирование модели для определения собственных напряжений и деформаций позволило перейти от случая одноосного стержневого армирования к двух- и трёхосно-ограниченным элементам. На основании положений деформационного подхода была предложена деформационная модель для определения собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона. Сформулированы основные предпосылки и допущения предлагаемой модели. Приведена блок-схема алгоритма итерационной процедуры, позволяющая выполнить расчет собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона. Проведены параметрические исследования собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона на стадии расширения. Представлены нормализованные зависимости связанных деформаций от варьируемых параметров. Установлена область эффективного использования стальной фибры с целью достижения эффекта «связывания» свободного расширения в напрягающем бетоне разной энергоактивности. Определено влияние изменения количества вводимой фибры на развитие связанных деформаций напрягающего бетона в разные временные интервалы. Полученные результаты могут быть использованы в проектных, учебных и научно-исследовательских учреждениях.

Ключевые слова: напрягающий фибробетон, собственные деформации, самонапряжение, объемное ограничение, модифицированная деформационная модель.

I.P. PAVLOVA¹, I.V. BELKINA²¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus²Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus

PARAMETRIC RESEARCH OF RESTRAINED STRAINS AND STRESSES OF SELF-STRESSED FIBER-REINFORCED CONCRETE AT THE STAGE OF EXPANSION

Abstract. One of the main advantages of self-stressed concrete is its ability to compensate for one of the main disadvantages inherent in mineral binders – shrinkage strains. However, approaches to predicting the properties of self-stressed concrete are not universal, since they are based mainly on phenomenological approaches and empirical dependencies. The main approaches to predicting strains and stresses arising in expansive concrete are energy- and deformation approaches. A number of researchers confirm the effectiveness of applying the deformation approach to determine intrinsic strains and stresses. Modification of the model for determining its own stresses and strains made it possible to move from the case of uniaxial bar reinforcement to two- and three-axis-limited elements.

Based on the provisions of the deformation approach, a deformation model was proposed to determine the intrinsic strains and stresses of self-stressed fiber-reinforced concrete. The main prerequisites and assumptions of the proposed model are formulated. A block diagram of the algorithm of the iterative procedure is given, which makes it possible to calculate the intrinsic strains and stresses of self-stressed fiber-reinforced concrete. Parametric studies of self-strains and stresses of self-stressed fiber-reinforced concrete at the stage of expansion were carried out. The normalized dependences of the bounded strains on the varied parameters are presented. The area of effective use of steel fibers to achieve "binding" effect of free expansion in self-stressed concrete of different energy-activity has been determined. Influence of change of introduced fiber amount on development of bound strains of self-stressed concrete at different time intervals has been determined. The obtained results can be used in design, educational and research institutions.

Keywords: fiber reinforced self-stressed concrete, restrained expansion strains, self-stressing, volumetric restraint, modified strains development model.

Введение

Напрягающий бетон обладает способностью не только компенсировать усадочные деформации, но и получать регулируемое исходное напряжённо-деформированное состояние элементов конструкции, положительно влияющее на их эксплуатационные характеристики и долговечность. Данный материал 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 Михайлова В.В., 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]. Такая работа является постоянной и не зависит от изменения величины коэффициента армирования и положения ограничивающих элементов в пределах сечения [1]. Данный подход позволяет выполнять расчёты, 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 расчёта ввиду большого количества входных параметров.

В дальнейшем развитие деформационных моделей позволило определять собственные напряжения и деформации не только для одноосно армированных элементов, но и для двух- и трёхосного ограничения [6-8]. Учет взаимного влияния ограничивающих связей стал возможен благодаря введению коэффициента Пуассона для бетона в раннем возрасте к выделенной упругой относительной деформации бетона [6].

Известно, что модификация структуры бетона одновременным вводом расширяющейся добавки и фибры может значительно улучшить эксплуатационную надежность и повысить эффективность конструкций и сооружений [9-13]. 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 объёмный преднапряженный фиброкаркас [14], дисперсное армирование напрягающего бетона следует рассматривать как пространственное ограничение. Вследствие этого, прогнозирование деформаций и напряжений необходимо осуществлять, руководствуясь положениями деформационного подхода.

1. Модели и методы

Модифицированная деформационная модель напрягающего фибробетона для случая трёхосного 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 (рисунок 1).

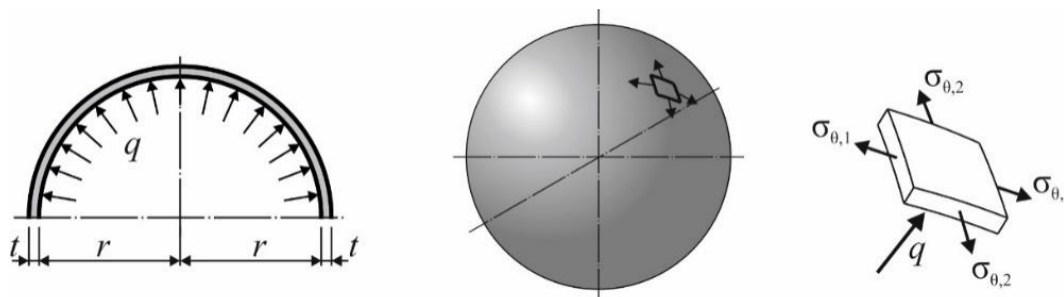


Рисунок 1 – Изображение сферической оболочки из фибры с возникающими в ней напряжениями σ_r и σ_θ от действия радиальной равномерно распределенной нагрузки q

Отношение толщины оболочки к радиусу шара пропорционально расходу фибры на единицу объема бетона. Оболочка связана с ядром и не проскальзывает по поверхности бетона при деформациях шара. Внутренние усилия, возникающие в расширяющемся бетонном ядре и внутренние усилия, возникающие в ограничивающей его оболочке, взаимно уравновешены. При расширении шара из напрягающего бетона радиусом r оболочка воспринимает радиальную равномерно распределенную нагрузку q , в результате в плоскости оболочки толщиной t возникают окружные и меридиональные напряжения, которые в силу шаровой симметрии равны. Расширение напрягающего бетонного ядра происходит равномерно во всех направлениях. При определении упругих деформаций напрягающего бетона объемное расширение учитывается введением коэффициента Пуассона для бетона в раннем возрасте. Связанные относительные деформации для каждого ортогонального направления (X , Y , Z) определяются путем вычитания из относительных деформаций свободного расширения упругих и неупругих относительных деформаций от ползучести бетона, а также упругих относительных деформаций в результате действия дополнительной реакции упругого ограничения. Напряжения от действия радиальной равномерно распределенной нагрузки q определяются решением задачи тонкостенной сферической оболочки (рисунок 1), нагруженной внутренним равномерным давлением.

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

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

Как видно из (1) результатом решения (откликом модели) являются собственные деформации ε_r и напряжения напрягающего фибробетона σ_{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 [15] пропорционально расходу фибры на единицу объема бетона. Другими словами, данный параметр отражает объемное соотношение волокон фибры ρ_s .

Жесткостные характеристики модели, к которым относятся модуль упругости и коэффициент Пуассона, условно можно разделить на параметры напрягающего бетона (E_c, μ_c) и параметры материала фибры (E_s, μ_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 τ 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 τ_i , который соотносится с τ суткам реального возраста бетона и учитывает влияние температурного режима на стадии твердения и расширения бетона (2):

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

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

Модуль упругости бетона в модифицированном возрасте, соответствующем реальному возрасту бетона τ_j , может быть получен из (3):

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

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 (4):

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

где ϕ_0 – базовый коэффициент ползучести;

где $\beta_c(\tau, \tau_0)$ – коэффициент, описывающий развитие ползучести во времени после нагружения (5):

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

β_H – коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона [3, 6].

Расчет по предложенной модели выполняется итерационным способом в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 2.

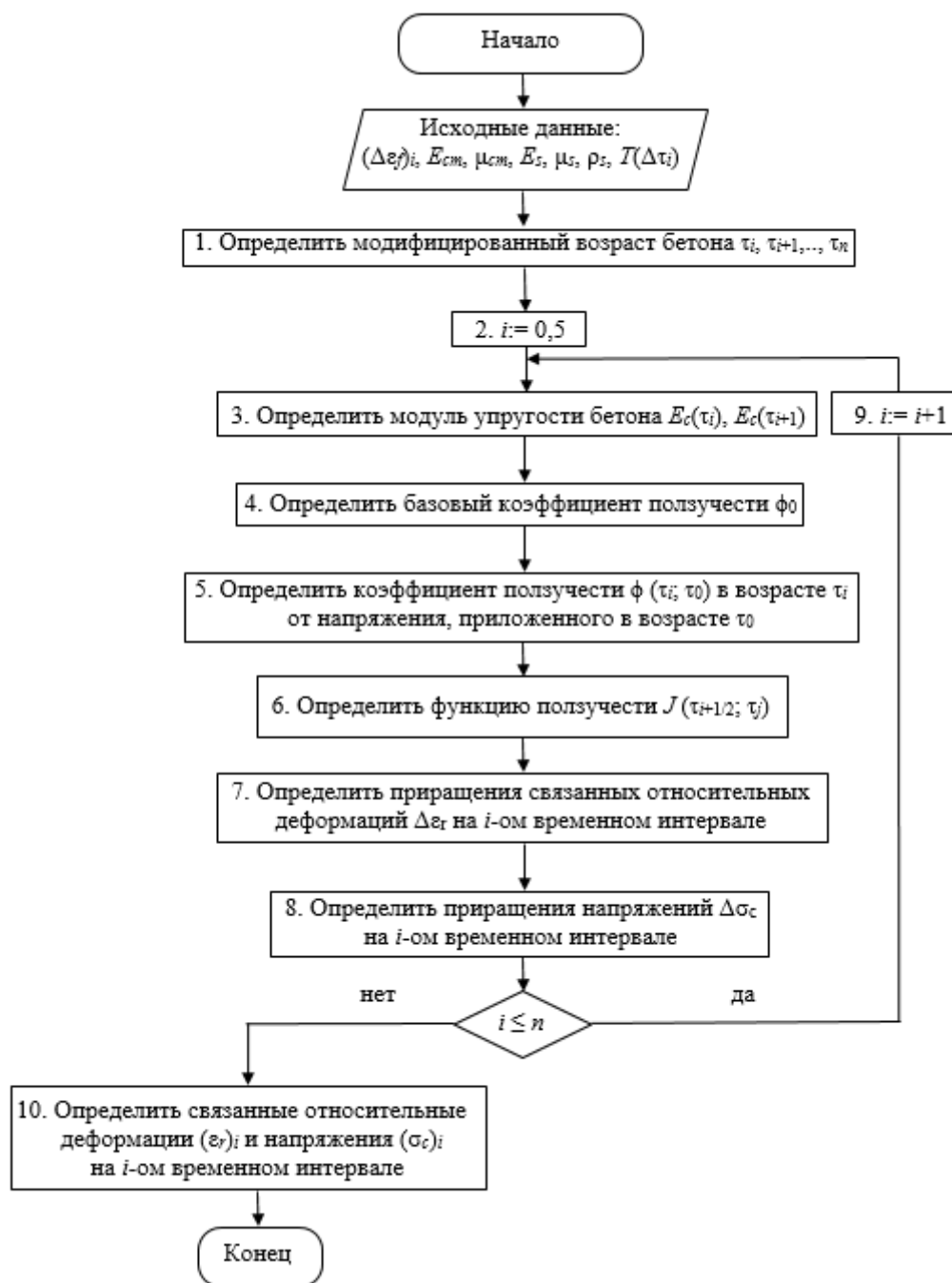


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма итерационной процедуры для расчета собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона

2. Параметрические исследования

2.1. Исходные данные

В качестве исследуемых составов приняты бетоны варьруемой энергоактивности и с разной кинетикой развития процесса расширения. Нормализованные зависимости изменения свободных относительных деформаций расширения во времени для составов напрягающего бетона различной активности $\varepsilon_f(\tau)$ были приняты по результатам испытаний и представлены на рисунке 3.

Объемное соотношение волокон ρ_s . Объемное соотношение варьировалось в пределах от 0 до 2,0 %.

Модуль упругости напрягающего бетонного композита в возрасте 28 суток E_{cm} . Параметрические исследования проводили для значений модуля упругости $E_{cm} = 25; 30; 35; 40$ и 45 ГПа соответственно.

Модуль упругости материала дисперсного армирования E_s . Модуль упругости для стальной фибры в данном параметрическом исследовании был принят $E_s = 200$ ГПа.

При выполнении параметрических исследований температурный режим на стадии твердения и расширения бетона был принят неизменным и составлял $T = 20$ °С.

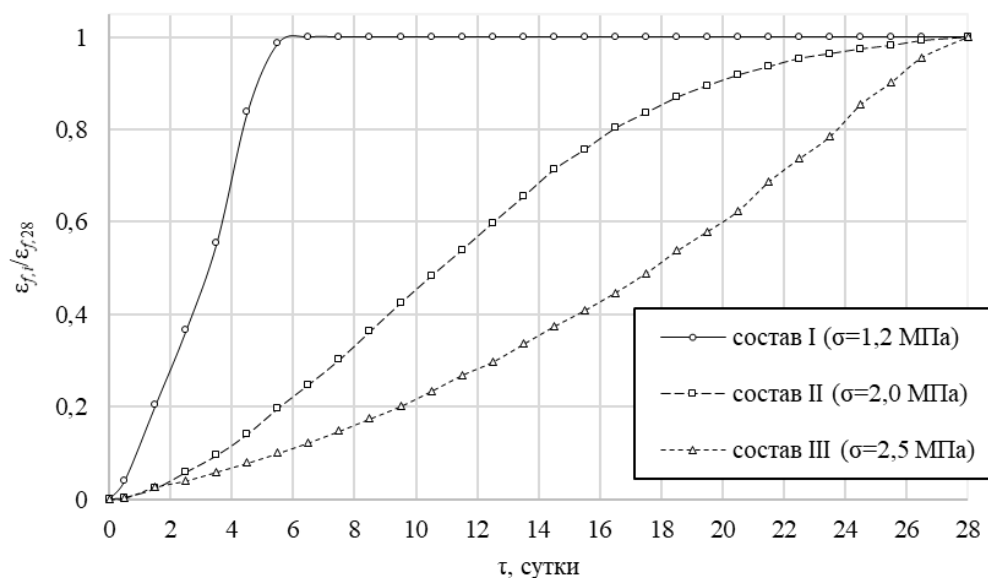


Рисунок 3 – Нормализованные экспериментальные графики изменения относительных деформаций $\varepsilon_f(\tau)$ для составов напрягающего бетона различной активности, принятые при параметрических исследованиях

2.2. Результаты параметрических исследований и их анализ

При моделировании собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона одним из основных параметров является объемное соотношение волокон ρ_s , выражающее количество фибры, приходящейся на единицу объема бетона (1 м^3), т.е. количество дисперсного армирующего элемента, способного сдерживать свободные деформации расширения $\varepsilon_f(\tau)$. На рисунках 4 – 6 представлены нормализованные графики зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от свободных деформаций $\varepsilon_{f,i}$ для напрягающего бетона составов I, II, III соответственно при различных объемных соотношениях волокон ρ_s . Из графиков установлено, что при минимальном содержании волокон ($\rho_s = 0,13\%$), зависимости приобретают нелинейный характер и сохраняют его и при дальнейшем возрастании количества фибры. При этом, с увеличением объемного содержания волокон связанные деформации бетона уменьшаются, что свидетельствует о восприятии волокнами напряжений и подтверждает высказанные ранее предположения. Также представленные результаты позволяют определить оптимальную область объемного содержания фибры, при которой ее свойства как ограничивающего элемента будут реализованы в полной мере. По мере увеличения объемного содержания после значения $\rho_s = 0,64\%$, что соответствует 50 кг стальной фибры на 1 м^3 бетона, дальнейшее уменьшение связанных деформаций носит незначительный характер. То есть область эффективного использования волокон с целью достижения эффекта «связывания» свободного расширения будет расположена в пределах значений от $\rho_s = 0,38\%$ до $\rho_s = 0,64\%$ (от 30 до 50 кг на 1 м^3 бетона), что соответствует дозировке стальной фибры, предлагаемой большинством исследователей.

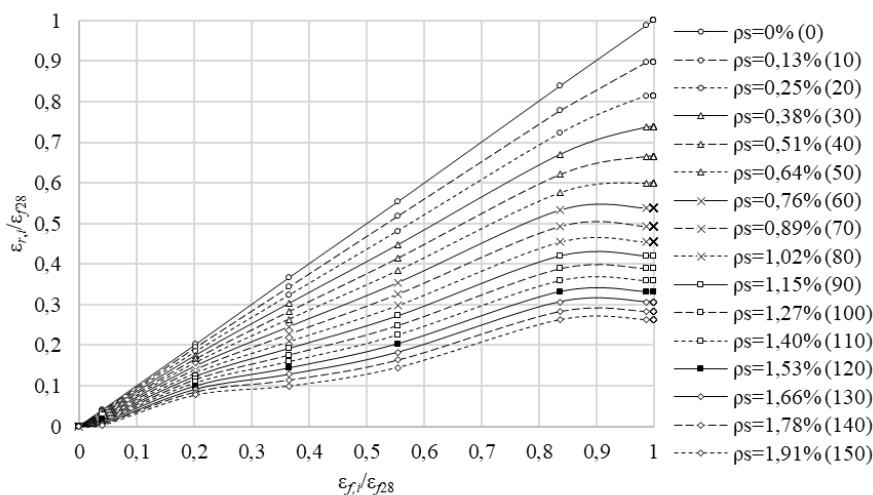


Рисунок 4 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от свободных деформаций $\varepsilon_{f,i}$ для напрягающего бетона состава I при различных объемных соотношениях волокон ρ_s (в скобках указано количество волокон в кг на 1 м^3 бетонной смеси)

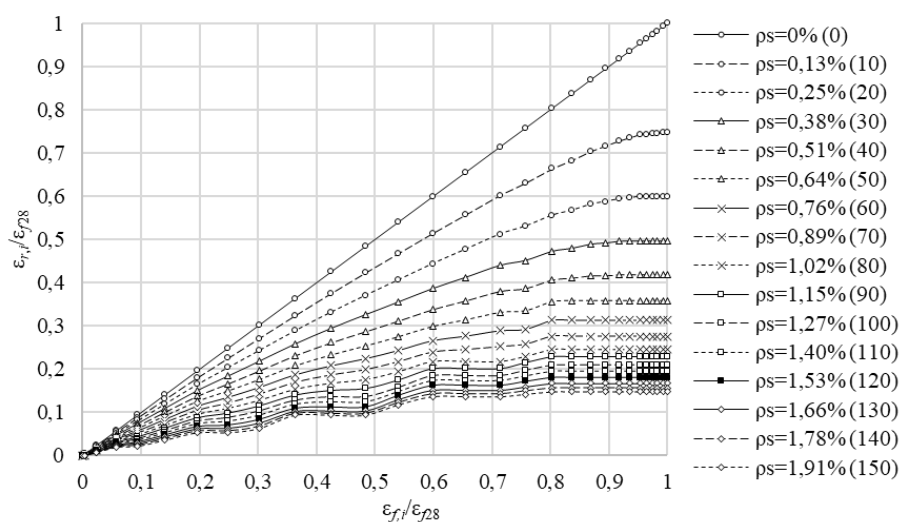


Рисунок 5 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от свободных деформаций $\varepsilon_{f,i}$ для напрягающего бетона состава II при различных объемных соотношениях волокон ρ_s (в скобках указано количество волокон в кг на 1 м^3 бетонной смеси)

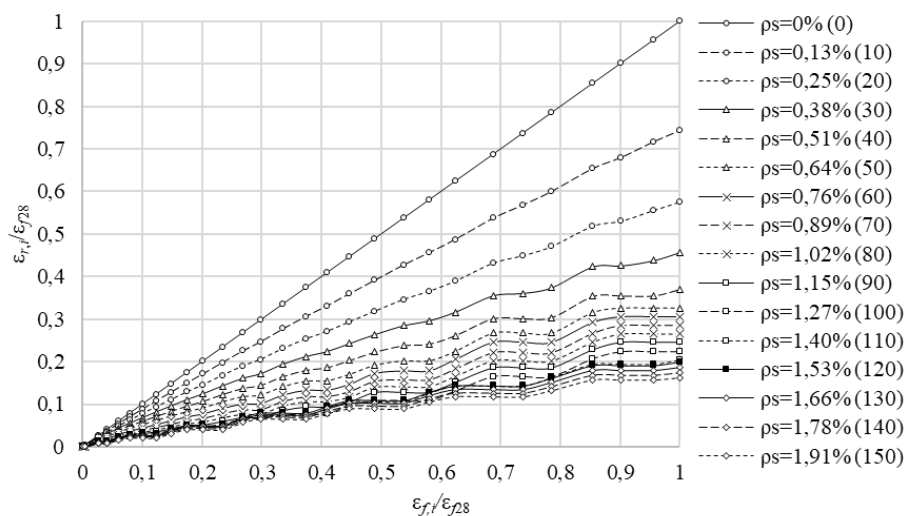


Рисунок 6 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от свободных деформаций $\varepsilon_{f,i}$ для напрягающего бетона состава III при различных объемных соотношениях волокон ρ_s (в скобках указано количество волокон в кг на 1 м^3 бетонной смеси)

На рисунках 7 – 9 представлены нормализованные графики изменения связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ при варьировании модуля упругости для напрягающего бетона составов I, II, III соответственно при объемном соотношении волокон $\rho_s=0,51\%$. Из графиков видно, что увеличение модуля упругости бетона приводит к сдерживанию развития свободных деформаций, что в итоге приводит к увеличению соотношения между связанными и свободными деформациями при высоких модулях упругости. Наоборот, снижение модуля упругости приводит к снижению общей жесткости композитной системы, свободные деформации растут, а связанные снижаются, поэтому для энергоактивных бетонов, склонных к разуплотнению на стадии расширения и спадам прочности и модуля упругости, необходимо предусматривать дисперсное армирование по верхнему пределу ($\rho_s=0,64\%$).

Также следует отметить, что в разные периоды времени (до и после стабилизации процесса расширения) изменение количества вводимой фибры приводит к разным эффектам в развитии связанных деформаций напрягающего бетона (см. рисунок 10 – 12). Для рассматриваемых составов, отличающихся и энергией расширения, и кинетикой протекания процесса расширения (составы I и II, в которых стабилизация процесса расширения наступила в период с 5 по 14 сутки, состав III с монотонно возрастающими деформациями расширения вплоть до контрольного возраста 28 сут.) 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 стабилизовавшемся процессе расширения приводит только к увеличению пластической составляющей в структуре бетона, 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.

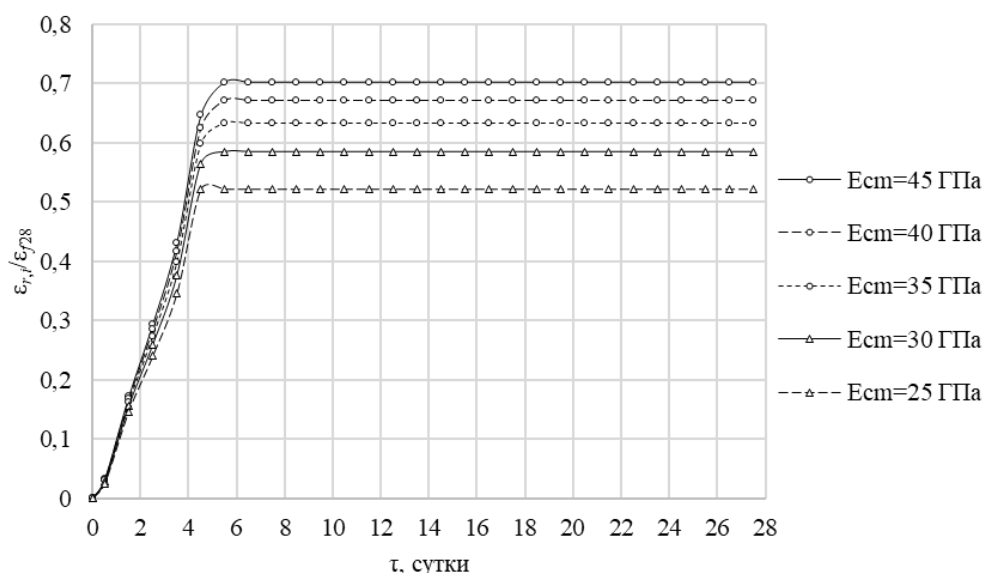


Рисунок 7 – Нормализованное изменение связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ во времени при модуле упругости напрягающего бетона $E_{cm}=45$ ГПа; $E_{cm}=40$ ГПа; $E_{cm}=35$ ГПа; $E_{cm}=30$ ГПа; $E_{cm}=25$ ГПа для состава I при $\rho_s=0,51\%$

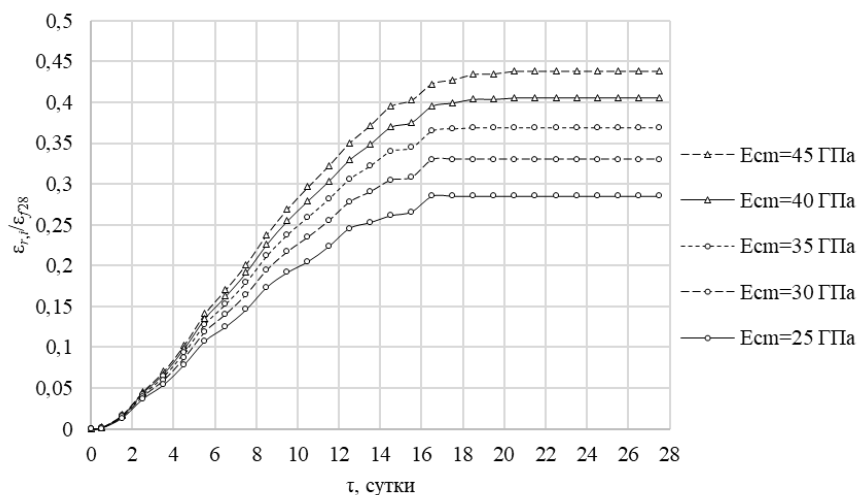


Рисунок 8 – Нормализованное изменение связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ во времени при модуле упругости напрягающего бетона $E_{cm}=45$ ГПа; $E_{cm}=40$ ГПа; $E_{cm}=35$ ГПа; $E_{cm}=30$ ГПа; $E_{cm}=25$ ГПа для состава II при $\rho_s=0,51\%$

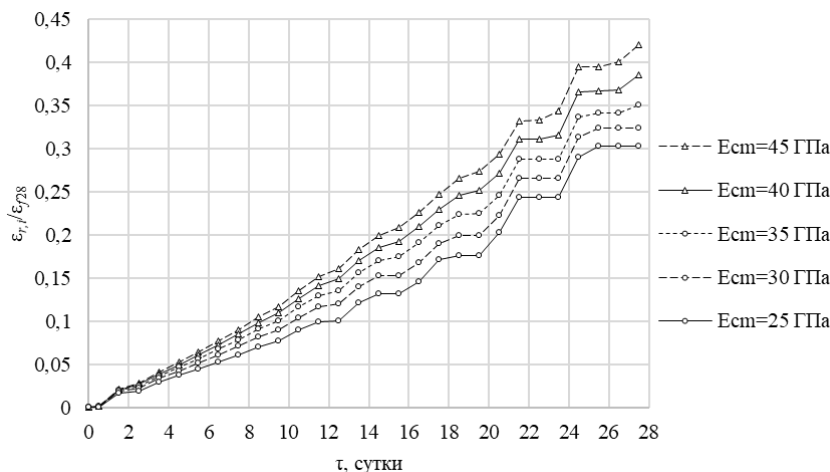


Рисунок 9 – Нормализованное изменение связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ во времени при модуле упругости напрягающего бетона $E_{cm}=45$ ГПа; $E_{cm}=40$ ГПа; $E_{cm}=35$ ГПа; $E_{cm}=30$ ГПа; $E_{cm}=25$ ГПа для состава III при $\rho_s=0,51\%$

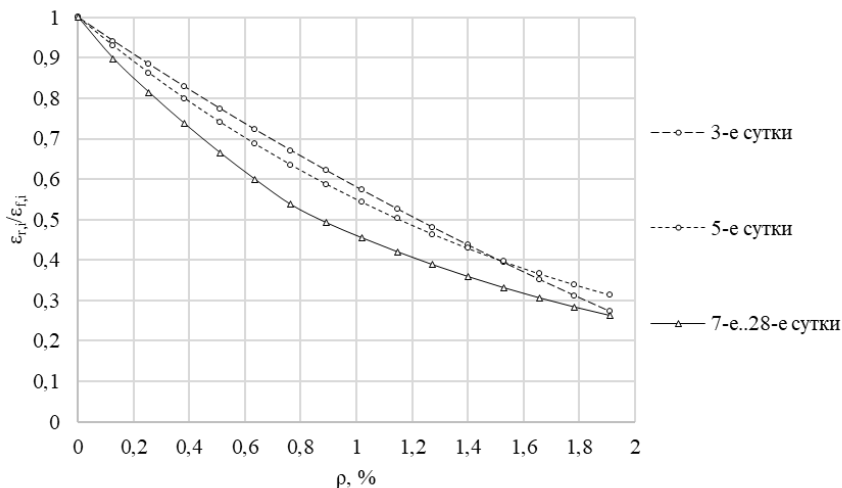


Рисунок 10 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от объемного соотношения ρ_s для напрягающего бетона состава I в определенный момент времени τ_i

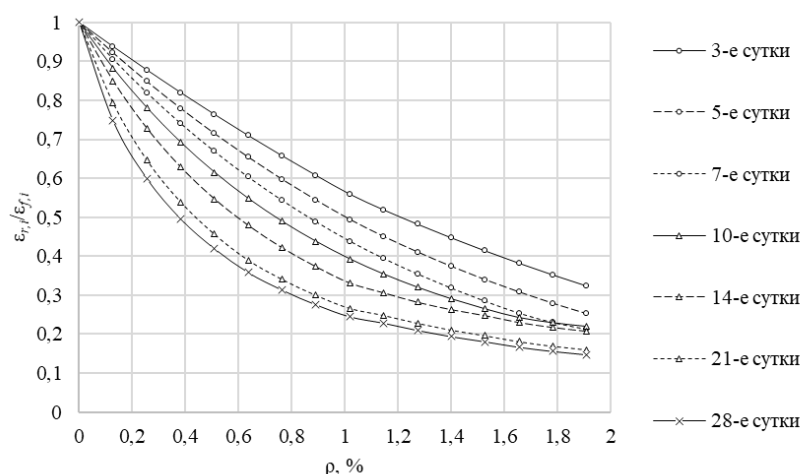


Рисунок 11 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от объемного соотношения волокон ρ_s для напрягающего бетона состава II в определенный момент времени τ_i

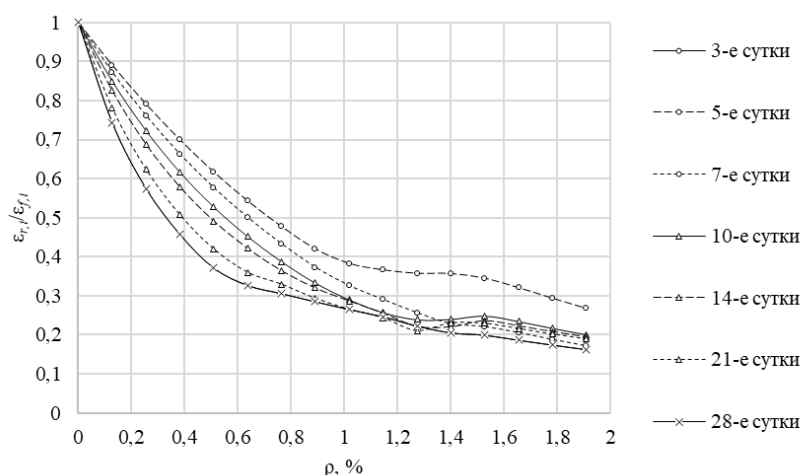


Рисунок 12 – Нормализованные зависимости связанных деформаций $\varepsilon_{r,i}$ от объемного соотношения волокон ρ_s для напрягающего бетона состава III в определенный момент времени τ_i

Выводы

На основании проведенных параметрических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изменяя количество и вид расширяющейся добавки и варьируя коэффициент армирования, можно получить напрягающие 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 1м^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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющиеся и напрягающиеся цементы и самонапряжённые конструкции. М.: Стройиздат, 1974. 389 с.
2. Tsuji Y. Methods of estimating chemical prestress and expansion distribution in expansive concrete subjected to uniaxial restraint Concrete Library of JSCE, 1984. № 3. Pp. 131-143.
3. Тур В.В., Семенюк О.С. Модели, применяемые для расчета связанных деформаций и самонапряжений в элементах из напрягающего бетона // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 1. С. 53–69.
4. Ito H., Maruyama I., Tanimura M., Sato R. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2004; (2). Pp. 155–174.
5. Semianiuk V., Tur V., Herrador M. F. Early age strains and self-stresses of Expansive concrete members under uniaxial restraint conditions. Construction and Building Materials. 2017;(131). Pp. 39–49.
6. Sannikava V. Tur V. The modified early age strains development model for the case of two-way restraint conditions // MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 350. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135000010>
7. Chang X., Huang C., Zhang P. Expansive behaviors of self-stressing concrete under different restraining conditions. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 26(4). 2011. Pp. 780–785.
8. Бондаренко В. М. Проектирование самонапряжённых сталефибробетонных элементов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 85–89.
9. Алексеев В.А., Баженов Ю.М., Баженова С.И., Баженова О.Ю., Бисембаев Р.С., Мирончук Н.С. Добавки с самостоятельной гидравлической активностью для набрызгбетона // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 8 (1008). С. 61–63.
10. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Оценка долгосрочного изменения свойств сталефибробетонных с расширяющими добавками // Строительные материалы. 2015. № 7. С. 21-23.
11. He H.A., Wang B.X., Lin J.T. Performance on steel fiber reinforced self-stressing concrete. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd. 2009. Vol. 400. Pp. 427-432. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.400-402.427.
12. Харченко А.И. [и др.]. Применение расширяющихся цементов для набрызгбетона в тоннельном строительстве // Вестник МГСУ. 2019. № 11. С. 1438-1448.
13. 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
14. Елсуфьева М.С. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне / М.С. Елсуфьева, В.Г. Соловьев, А.Ф. Бурьянов // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 60-63.
15. Павлова И.П., Белкина И.В. Собственные деформации напрягающего бетона с дисперсным армированием: часть 1. Моделирование // Известия вузов. Строительство. 2022. № 9. С. 5–17.

REFERENCES

1. Mikhailov V., Litver S. Rasshiryayushchiesya i naprygayushchiesya cementy i samonapryazhyonnye konstrukcii [Expansive and self-stressing cements and self-stressed reinforced structures]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 389 p. (rus)
2. Tsuji Y. Methods of estimating chemical prestress and expansion distribution in expansive concrete subjected to uniaxial restraint. Concrete Library of JSCE, 1984. No. 3. Pp. 131-143.
3. Tur V., Semianiuk V. Modeli, primenyaemye dlya rascheta svyazannyh deformacij i samonapryazhenij v elementah iz naprygayushchego betona [Models for restrained strains and self-stressing stresses in the members made

- of expansive concrete calculation]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2016. No. 1. Pp. 53–69. (rus)
4. Ito H., Maruyama I., Tanimura M., Sato R. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004;(2). Pp. 155–174.
 5. Semianiuk V., Tur V., Herrador M. F. Early age strains and self-stresses of Expansive concrete members under uniaxial restraint conditions. *Construction and Building Materials*. 2017;(131). Pp. 39–49.
 6. Sannikava V. Tur V. The modified early age strains development model for the case of two-way restraint conditions. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Pp. 350.
 7. Chang X., Huang C., Zhang P. Expansive behaviors of self-stressing concrete under different restraining conditions. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26(4). 2011. Pp. 780–785.
 8. Bondarenko V. M. Proektirovanie samonapryazhyonnyh staletrubobetonnyh elementov [Design of self-stressing CFST elements]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2012. No. 1. Pp. 85–89. (rus)
 9. Alekseev V.A., Bazhenov Yu.M., Bazhenova S.I., Bazhenova O.Yu., Bisembaev R.S., Mironchuk N.S. Additive having hydraulic activity forshotcrete. [Additives with independent hydraulic activity for sprinkling]. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2018; 8(1008):61-63. (rus)
 10. Elsufieva M. S., Soloviev V. G., Buryanov A. F. Evaluation of the long-term change in the properties of steel fiber concrete with expanding additives [Ocenka dolgosrochnogo izmeneniya svoystv stalefibrobetonov s rasshiryayushchimi dobavkami]. *Construction Materials*. 2015. No. 7. Pp. 21-23. (rus)
 11. He H. A., Wang B. X., Lin J. T. Performance on steel fiber reinforced self-stressing concrete. *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd*. 2009. Vol. 400. Pp. 427-432. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.400-402.427.
 12. Harchenko A.I. [et al.]. The use of expanding cements for concrete spraying in tunnel construction. [Primenenie rasshiryayushchihsya cementov dlya nabryzgbetona v tonnel'nom stroitel'stve]. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 11 (134). Pp. 1438-1448. (rus)
 13. 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
 14. Elsufieva M.S., Soloviev V.G., Buryanov A.F. Primenenie rasshiryayushchihsya dobavok v stalefibrobetone [The use of expanding additives in steel fiber concrete]. *Construction Materials*. 2014. No. 8. Pp. 60-63. (rus)
 15. Pavlova I.P., Belkina I.V. Sobstvennye deformatsii napryagayushchego betona s dispersnym armirovaniem: chast' 1. Modelirovanie [The restrained expansion strains of self-stressed concrete with disperse reinforcement: part 1. Modeling]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022. No. 9. Pp. 5–17. (rus) doi:10.32683/0536-1052-2022-765-9-5-17

Информация об авторах:

Павлова Инесса Павловна

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов.
E-mail: pavlinna@tut.by

Белкина Ирина Владимировна

УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры строительного производства.
E-mail: lutaja-95@mail.ru

Information about authors:

Pavlova Inessa P.

Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus, PhD in technical sciences, associated professor, associated professor of the department of concrete technology and building materials.
E-mail: pavlinna@tut.by

Belkina Irina V.

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus, master in technical sciences, senior lecturer of the department of construction production.
E-mail: lutaja-95@mail.ru