

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/43TVN416.pdf>

Статья опубликована 09.08.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Денисов А.В., Рогачев К.В., Иваненко С.В. Результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки при твердении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/43TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 666.97.620.1

Денисов Александр Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, Москва¹
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: den-al-v@inbox.ru

Рогачев Константин Викторович

АО «Институт «Оргэнергострой», Россия, Москва²
Заместитель начальника отдела
E-mail: Kost.rog.86@gmail.com

Иваненко Светлана Владимировна

АО «Проектная мастерская «Формат», Россия, Москва³
Конструктор 3 категории
E-mail: swetlanaivanenko@gmail.com

**Результаты проверки модели структуры фибробетона,
разработанной для аналитического определения его
термических и радиационных изменений, по
экспериментальным данным усадки при твердении**

Аннотация. Статья посвящена вопросам разработки и проверки аналитической модели структуры фибробетона, разработанной для аналитического определения его термических и радиационных изменений. Описывается напряженно-деформированное состояние фибробетона, возникающее при усадке цементного камня. В статье рассматриваются два подхода описания напряженно-деформированного состояния фибробетона в зависимости от его структуры. При экспериментальном и теоретическом определении усадки фибробетона, рассматривались различные типы фибр: волнистая рубленая из проволоки, фрезерованная из слябов с анкерами в виде отгибов по концам волокна, переменного профиля резанная из стального листа, рубленая из проволоки с анкерами по концам; и различные проценты армирования: 0.5%, 1.0%, 1.5%, 3.0%, 6.0%. В статье представлены результаты сравнения расчетной и экспериментальной плотности различных составов фибробетона, а также

¹ г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

² 115114, г. Москва Дербеневская наб., дом 7, стр. 10

³ г. Москва, проезд Серебрякова 14, к. 11

сравнения усадки матрицы без фибры и фактической усадки матрицы этих составов, вычисленной по рассматриваемой модели. Результатом проверки модели структуры фибробетона, разработанной для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки различных составов при твердении подтверждена принципиальная возможность ее использования в расчетах деформаций фибробетонов вследствие деформаций их компонентов.

Ключевые слова: фибробетон; структура; усадка; аналитическая модель; цементный камень; сталефибробетон; радиационная стойкость; термическая стойкость; плотность

Фибробетоны - мелкозернистые бетоны, дисперсно армированные стальными, стеклянными, базальтовыми или другими волокнами (фиброй), отличаются от бетонов повышенными механическими и физическими свойствами и поэтому имеют перед бетонами преимущества, особенно при изготовлении конструкций небольшой толщины.

В связи с этим при строительстве атомных электростанций в качестве легкой несъемной опалубки сборно-монолитных конструкций планируется использовать панели из фибробетона [1]. Однако для обоснования возможности их использования в радиационно- и термически нагруженных конструкциях АЭС важными являются вопросы прогнозирования и учета термических и радиационных изменений фибробетона.

Для прогнозирования термических и радиационных изменений фибробетона в работах [2, 3] была предложена модель структуры фибробетона для аналитического определения его термических и радиационных изменений по данным о термических и радиационных изменениях их составляющих материалов.

Предложенная в работах [2, 3] модель была основана на описанных в работах [4-7] моделях, использованных и положительно апробированных для аналитического определения радиационных и термических изменений бетонов и растворов. В связи с этим для ее проверки могут быть использованы любые процессы, связанные с деформациями и изменениями составляющих фибробетон материалов, в том числе процесс усадки при твердении.

В настоящей работе приводятся результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной в работах [2, 3] для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки при твердении.

Использовали данные работ [8, 9], по влиянию типа фибры и процента армирования на усадку при твердении сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей.

Технологический состав раствора матрицы фибробетона и характеристики фибры фибробетонов, исследованных в работе [8, 9] представлен в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы исследованных в работах [8, 9] (в кг/м³)

Цемент	Песок	Вода	Микрокремнезем	Гиперпластификатор Sika
800	1250	260	45	8

Фибру в этих работах вводили в количестве, соответствующем объемному содержанию $\mu_{fv}=0,5\%$, $\mu_{fv}=1\%$, $\mu_{fv}=1,5\%$, $\mu_{fv}=3\%$ и $\mu_{fv}=6\%$.

Результаты определения суммарной усадки различных составов фибробетона в возрасте 180 суток, когда усадка практически стабилизировалась, полученные в работах [8, 9] приведены в табл. 3.

Таблица 2

Фибра использованная в работах [8, 9] и ее характеристики

Типа фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению R _{ny} , МПа	Модуль упругости E _f , МПа
ФСП-В 30×0.8	Волнистая рубленая из проволоки	30	0,8	860	190000
ФСП-Люкс 15×0.3		15	0,3	2450	190000
Нarex 32×1.2	Фрезерованная из слябов с анкерами в виде отгибов по концам волокна	32	1,2	600	200000
ФСЛ 40×0.8	Переменного профиля резанная из стального листа	40	0,8	580	210000
ФСП-А 30×0.3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам	30	0,3	2650	190000

Таблица 3

Нормативные значения усадки фибробетонов, исследованных в работах [8, 9]

Процент армирования	Деформация усадки ε _s ·10 ⁻⁵ фибробетона с фиброй				
	ФСП-В 30×0.8	ФСП-Люкс 15×0.3	Нarex 32×1.2	ФСЛ 40×0.8	ФСП-А-30×0.3
0	83,9	83,9	83,9	83,9	83,9
0.5	86,4	86,6	105,3	83,2	96,7
1.0	94,4	77,6	121,1	82,3	91,3
1.5	69,1	73,0	89,8	88,7	88,4
3.0	68,4	65,4	76,0	87,2	-
6.0	-	50,4	84,3	52,4	-

В соответствии с [2, 3] определение деформаций фибробетона с матрицей из раствора за счет термически, радиационных или усадочных изменений размеров и объема его составляющих зависит от соотношения между средним расстоянием между волокнами фибры C_f и средним диаметром зерен песка D.

При C_f>D в соответствии с предложенной в работах [2, 3] моделью в виде стержня-волокна фибры, окруженного матрицей из раствора микроструктурные напряжения в компонентах фибробетона и деформации фибробетона определяли по формулам:

$$\sigma_f = \left(\frac{\Delta \ell_p}{\ell_p} - \frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} \right) \frac{E_f E_p (1 - A_f)}{(1 - A_f) E_p + A_f E_f} \quad (1)$$

$$\sigma_p = \left(\frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} - \frac{\Delta \ell_p}{\ell_p} \right) \frac{E_f E_p A_f}{(1 - A_f) E_p + A_f E_f} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \ell_{\text{фб}}}{\ell_{\text{фб}}} = \frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} + \frac{\sigma_f}{E_f} \quad \text{- при } \sigma_p \geq R_p, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V_{\text{фб}}}{V_{\text{фб}}} = 3 \left(\frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} + \frac{\sigma_{f, \text{ср}}}{E_f} \right) \quad \text{- при } \sigma_p \geq R_p, \quad (4)$$

$$\frac{\Delta \ell_{\text{фб}}}{\ell_{\text{фб}}} = \frac{\Delta \ell_{\text{р}}}{\ell_{\text{р}}} + \frac{\sigma_{\text{р}}}{E_{\text{р}}} \quad - \text{ при } \sigma_{\text{f}} \geq R_{\text{ну}} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta V_{\text{фб}}}{V_{\text{фб}}} = 3 \left(\frac{\Delta \ell_{\text{р}}}{\ell_{\text{р}}} + \frac{\sigma_{\text{р}}}{E_{\text{р}}} \right) \quad - \text{ при } \sigma_{\text{f}} \geq R_{\text{ну}} \quad (6)$$

где: σ_{f} и $\sigma_{\text{р}}$ - микроструктурные напряжения за счет разницы изменений размеров фибры и матрицы в фибре и растворе-матрице соответственно;

E_{f} и $E_{\text{р}}$ - модули деформации фибры и раствора-матрицы соответственно;

$\frac{\Delta \ell_{\text{р}}}{\ell_{\text{р}}}$ и $\frac{\Delta \ell_{\text{f}}}{\ell_{\text{f}}}$ - относительные изменения размеров раствора и фибры соответственно;

$\frac{\Delta \ell_{\text{фб}}}{\ell_{\text{фб}}}$ и $\frac{\Delta V_{\text{фб}}}{V_{\text{фб}}}$ - относительные изменения размеров и объема фибробетона за счет изменения размеров и объема составляющих фибробетона;

A_{f} - относительная площадь фибры в модели.

Для A_{f} в формулах (2, 3) в работе [3] была предложена формула $A_{\text{f}}=(d_{\text{f}}/C_{\text{f}})^2$ исходя из цилиндрической модели, представляющую собой цилиндрический стержень волокна-фибры окруженный оболочкой в виде трубы круглого сечения). Однако более строго рассмотреть призматическую модель, на которые делится массив фибробетона, представляющую собой цилиндрический стержень волокна-фибры, окруженный оболочкой в виде трубы квадратного сечения. В связи с этим A_{f} определяли по формуле:

$$A_{\text{f}}=(\pi d_{\text{f}}^2/4)/C_{\text{f}}^2=0,785(d_{\text{f}}/C_{\text{f}})^2 \quad (7)$$

При проведении расчетов учитывали:

- если $\sigma_{\text{р}} > R_{\text{р}}$, то напряжения будут релаксировать за счет образования трещин и поддерживаться на уровне $\sigma_{\text{р}} = R_{\text{р}}$ за счет чего напряжения σ_{f} будут также снижаться пропорционально снижению величины $\sigma_{\text{р}}$ в соответствии с выражением $\sigma_{\text{f исп}} = \sigma_{\text{ф}} R_{\text{р.цк}} / (\sigma_{\text{цк}})$.
- если $\sigma_{\text{f}} > R_{\text{ну}}$, то напряжения будут релаксировать за счет деформирования фибры и поддерживаться на уровне $\sigma_{\text{f}} = R_{\text{ну}}$, за счет чего напряжения $\sigma_{\text{р}}$ будут также снижаться пропорционально снижению величины σ_{f} в соответствии с выражением $\sigma_{\text{р.исп}} = \sigma_{\text{р}} R_{\text{ну}} / (\sigma_{\text{ф}})$.

При $C_{\text{f}} \leq D$ в соответствии с предложенной в работах [2, 3] моделью в виде шаровидных зерен заполнителя, расположенных в кубической гранецентрированной решетке, окруженных матрицей из цементного камня, армированного волокнами фибры изменение объема и микроструктурные напряжения в компонентах фибробетона определяются по формулам:

$$\frac{\Delta V_{\text{фб}}}{V_{\text{фб}}} = \left\{ \left[C_{\text{уп}}^n \left(1 + \frac{\Delta V_3^n}{V_3^n} + 3 \frac{\sigma_n}{E_n} (1 - 2\mu_n) \right) \right]^{\frac{1}{3}} + \left[1 - \left(C_{\text{уп}}^n \right)^{\frac{1}{3}} \right] \left[1 + \frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} + 3 \frac{\sigma_{\text{а.ц.к.}}}{E_{\text{а.ц.к.}}} (1 - \mu_{\text{а.ц.к.}}) \right]^{\frac{1}{3}} \right\}^3 - 1 \approx \left[\frac{\Delta V_3^n}{V_3^n} + 3 \frac{\sigma_n}{E_n} (1 - 2\mu_n) \right] \left(C_{\text{уп}}^n \right)^{\frac{1}{3}} + \left[1 - \left(C_{\text{уп}}^n \right)^{\frac{1}{3}} \right] \left[\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} + 3 \frac{\sigma_{\text{а.ц.к.}}}{E_{\text{а.ц.к.}}} (1 - \mu_{\text{а.ц.к.}}) \right] \quad (8)$$

$$\sigma_n = \left(\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} - \frac{\Delta V_n}{V_n} \right) \frac{2(x^3 - 1)}{3N} \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{а.ц.к.}} = \left(\frac{\Delta V_n}{V_n} - \frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} \right) \frac{2 + x^3}{3N} \quad (10)$$

где: $\frac{\Delta V_{\text{фб}}}{V_{\text{фб}}}$, $\frac{\Delta V_3^n}{V_3^n}$ и $\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}}$ - относительное изменение объема фибробетона, песка и армированного фиброй цементного камня при облучении, нагревании или усадке при твердении;

μ_n и $\mu_{\text{а.ц.к.}}$ - коэффициент Пуассона материала песка и армированного фиброй цементного камня;

$C_{\text{уп}}^n$ - степень уплотнения заполнителя, определяемая по параметрам модели из условия $D/(D+d) = (C_{\text{уп}}^n)^{1/3}$.

$\sigma_{\text{а.ц.к.}}$ и σ_n - микроструктурные напряжения в армированном фиброй цементном камне и в песке из-за различий в величинах изменений размеров и объема; составляющих;

E_n и $E_{\text{а.ц.к.}}$ - модуль деформации песка и армированного фиброй цементного камня.

$$N = \frac{1}{E_n} [2 - 4\mu_n + x^3(1 + \mu_n)] + \frac{2}{E_{\text{а.ц.к.}}} [2\mu_{\text{а.ц.к.}} - 1 + x^3(1 - \mu_{\text{а.ц.к.}})] \quad (11)$$

$$x = (D+d)/D \quad (12)$$

Напряжения в элементах, деформации и модуль упругости армированного цементного камня в соответствии с этой моделью определяются выражениями:

$$\sigma_f = \left(\frac{\Delta \ell_{\text{цк}}}{\ell_{\text{цк}}} - \frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} \right) \frac{E_f E_{\text{цк}} (1 - A_f)}{(1 - A_f) E_{\text{цк}} + A_f E_f} \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{цк}} = \left(\frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} - \frac{\Delta \ell_{\text{цк}}}{\ell_{\text{цк}}} \right) \frac{E_f E_{\text{цк}} A_f}{(1 - A_f) E_{\text{цк}} + A_f E_f} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta \ell_{\text{а.ц.к.}}}{\ell_{\text{а.ц.к.}}} = \frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} + \frac{\sigma_f}{E_f} \quad \text{- при } \sigma_{\text{цк}} \geq R_{p,\text{цк}} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} = 3 \left(\frac{\Delta \ell_f}{\ell_f} + \frac{\sigma_f}{E_f} \right) \quad \text{- при } \sigma_{\text{цк}} \geq R_{p,\text{цк}} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta \ell_{\text{а.ц.к.}}}{\ell_{\text{а.ц.к.}}} = \frac{\Delta \ell_{\text{цк}}}{\ell_{\text{цк}}} + \frac{\sigma_{\text{цк}}}{E_{\text{цк}}} - \text{при } \sigma_f \geq R_{\text{нц}} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}} = 3 \left(\frac{\Delta \ell_{\text{цк}}}{\ell_{\text{цк}}} + \frac{\sigma_{\text{цк}}}{E_{\text{цк}}} \right) - \text{при } \sigma_f \geq R_{\text{нц}} \quad (18)$$

$$E_{\text{а.ц.к.}} = E_f A_f + E_{\text{цк}} \cdot (1 - A_f) \quad (19)$$

где: σ_f и $\sigma_{\text{цк}}$ - микроструктурные напряжения в волокне фибры и цементном камне;

$\frac{\Delta \ell_f}{\ell_f}$ и $\frac{\Delta \ell_{\text{цк}}}{\ell_{\text{цк}}}$ - линейные деформации волокон фибры и цементного камня фибробетона.

$\frac{\Delta \ell_{\text{а.ц.к.}}}{\ell_{\text{а.ц.к.}}}$ и $\frac{\Delta V_{\text{а.ц.к.}}}{V_{\text{а.ц.к.}}}$ - изменения размеров и объема армированного фиброй цементного камня;

E_f и $E_{\text{цк}}$ - модули упругости волокон фибры и цементного камня фибробетона;

$E_{\text{а.ц.к.}}$ - модуль деформации армированного цементного камня.

Для A_f в работе [3] были предложены формулы, учитывающие только толщину прослойки камня на участке минимального расстояния между зернами заполнителей:

$$A_f = (\pi d_f^2 / 4) / (d_f C_f) - \text{при } d_f \geq d \quad (20)$$

$$A_f = (\pi d_f^2 / 4) / (d C_f) - \text{при } d_f < d \quad (21)$$

Однако более строго учесть площадь всего цементного камня между зернами заполнителя. В связи с этим величину A_f определяли по формуле:

$$A_f = \frac{\frac{\pi d_f^2}{4} D / C_f}{(D + d)^2 - \frac{\pi D^2}{4}} \quad (22)$$

При проведении расчетов учитывали, что если $\sigma_{\text{цк}} > R_{\text{р.цк}}$ - прочности на растяжение цементного камня, то напряжения будут релаксировать за счет образования трещин и поддерживаться на уровне $\sigma_{\text{цк}} = R_{\text{р.цк}}$, за счет чего напряжения σ_f будут также снижаться пропорционально снижению величины $\sigma_{\text{цк}}$ в соответствии с выражением $\sigma_{f \text{ исп}} = \sigma_f R_{\text{р.цк}} / (-\sigma_{\text{це}})$.

Механические характеристики матрицы фибробетона в расчетах принимали исходя из следующих данных и соображений.

В соответствии с данными работы [10] кубиковую прочность раствора матрицы на сжатие принимали равной 85 МПа, что соответствует марке М800, классу В=0,8х80 ≈ В60.

Прочность раствора матрицы на растяжение в соответствии с данными [10] принимали равной $R_p = 5$ МПа.

Значение модуля деформации раствора матрицы фибробетона принимали по СНиП 52-01-2003. Хотя при В60 данные для модуля упругости мелкозернистого бетона отсутствуют, имеются значения для обычного бетона В60 $E_b = 39,5 \times 10^3$ МПа, для тяжелого бетона при В40 $E_b = 36 \times 10^3$ МПа и для мелкозернистого бетона В40 $E_b = 28,5 \times 10^3$ МПа. Исходя из соотношения

между модулями упругости мелкозернистого и обычного бетона $28,5 \times 10^3 / 36 \times 10^3 = 0,79$ получаем для мелкозернистого бетона $E_b = 39,5 \times 0,79 = 31 \times 10^3$ МПа.

С учетом продолжительности действия нагрузки значение модуля деформации матрицы фибробетона принимали равным

$$E_{p.} = E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,\tau}} = 31 / (1 + 1) = 15,5 \times 10^3 \text{ МПа} = 1,55 \times 10^4 \text{ МПа.}$$

В расчетах принимали следующие значения механических свойств компонентов:

- для фибры R_{ny} и E_f – по данным работ [8, 9], приведенным в табл. 2;
- для цементного камня матрицы $\mu_{a,\text{ц.к.}} = 0,2$ – как у бетонов, $R_{p,\text{ц.к.}}$ и $E_{\text{ц.к.}}$ – как у раствора матрицы – $R_p = 5$ МПа и $E_f = 1,55 \times 10^4$ МПа;
- для к песка (в основном кварцевого) принимали $E_n = 9,6 \times 10^4$ МПа и $\mu_n = 0,08$ по [11].

По [12] среднее расстояние между волокнами фибры C_f определяли по формуле:

$$C_f = k_{op} d_f / (\mu_{fv})^{0,5} \quad (23)$$

где: μ_{fv} – объемное содержание фибры, от ед.;

d_f – диаметр фибры, мм;

k_{op} – коэффициент, учитывающий ориентацию фибры;

$k_{op} = 0,885$ – при ориентации фибры в одном направлении (однонаправленном армировании);

$k_{op} = 1,11$ – при ориентации фибры в двух направлениях (плоско-произвольном армировании);

$k_{op} = 1,25$ – при ориентации фибры в 3-х направлениях (объемно-произвольном армировании).

Учитывая, что усадку определяли на образцах длиной 250 мм (база определения усадки) сечением 25 x 25 мм и укладку смеси в опалубку осуществляли сверху в открытую грань 250x25 мм, только у фибры ФСЛ-Люкс 15x0.3 длиной 15 мм < 25 мм ориентация может быть как вдоль так и поперек длины образцов (в трех направлениях) и $k_{op} = 1,25$.

Для фибры ФСЛ 40x0.8 длиной 40 мм > 25 мм и длине проекций при расположении под углом 45° $L_{пр} = 28,5$ мм > 25 мм ориентация может быть преимущественно только вдоль длины образцов (в одном направлении) и $k_{op} = 0,885$.

Для фибры других типов из-за длины 30-32 мм > 25 мм и длине проекций при расположении под углом 45° $L_{пр} = 22,5$ мм < 25 мм ориентация может быть как вдоль длины образцов, так и под углом до 45-50°С (среднее между распределением в трех направлениях и в одном) и $k_{op} = (0,885 + 1,25) / 2 = 1,07$.

Результаты определения C_f проведены в таблице 4 с результатами расчетов усадки.

Так как средний диаметр зерен песка составляет 2÷3 мм, то применительно к исследованным составам фибробетонов случай $C_f \leq D$ (чистый или близкий к нему) наблюдается только у составов с фиброй ФСЛ-Люкс 15x0.3 при ее содержании 3% и 6% и у составов с фиброй ФСЛ-А 30x0.3 при ее содержании 1,5%. У остальных составов – случай $C_f > D$.

При проведении расчетов усадку цементного камня определяли по исходным формулам работ [4-7] для растворов на основании величины усадки раствора-матрицы без фибры и технологического состава матрицы из формулы:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} \approx \frac{\Delta V_3^n}{V_3^n} \left(C_{yn}^n \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{\Delta V_{шк.}}{V_{шк.}} \left(1 - \left(C_{yn}^n \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (24)$$

Степень уплотнения песка определяли исходя из фактического относительного объема песка в растворе V_p , относительного объема песка в уплотненном состоянии $V_{п.уп.}$

При расходе песка $\Pi=1250$ кг/м³ и средней плотности зерен песка 2600 кг/м³ $V_{п.н}=1250/2600=0,48$ и $V_{п.уп.}=0,63$ (среднее значение для песков)

$$C_{yn}^n = 0,48/0,63 = 0,762$$

$$D/(D+d) = \left(C_{yn}^n \right)^{1/3} = (0,76)^{1/3} = 0,913;$$

$$x = (D+d)/D = \left(C_{yn}^n \right)^{-1/3} = (0,76)^{-1/3} = 1,095;$$

$$\frac{\Delta V_3^n}{V_3^n} = 0 \quad \frac{\Delta V_p}{V_p} = 3 \quad \frac{\Delta \ell_p}{\ell_p}$$

Из формулы (20) при $\frac{\Delta V_3^n}{V_3^n} = 0$ и $\frac{\Delta V_p}{V_p} = 3$ $\frac{\Delta \ell_p}{\ell_p} = 3 \times -83,9 \times 10^{-5} = -251,7 \times 10^{-5}$ (со знаком «-»), так как усадка) получаем

$$\frac{\Delta V_{шк.}}{V_{шк.}} = \frac{\Delta V_p}{V_p} \left(1 - \left(C_{yn}^n \right)^{\frac{1}{3}} \right) = -251,7 \times 10^{-5} / (1 - 0,913) = -2893 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta \ell_{шк.}}{\ell_{шк.}} = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_{шк.}}{V_{шк.}} = 1/3 \times -2893 \times 10^{-5} = -964 \times 10^{-5}$$

Так как в модели принимается $D+d=1$, то в относительных единицах $D=0,913$, $d=0,087$. В абсолютных единицах при среднем размере зерен песка, использованного в работах [8, 9] $D=d_{cp}=2$ мм $d=d_{cp}/0,913$ - $d_{cp}=2/0,913-2=0,19$ мм.

Результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной в работах [2, 3] для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки при твердении различных составов работ [8, 9] для случая $C_f > D$ приведены в табл. 4 на рис. 1-5.

Видно, что у составов фибробетона с фиброй ФСП-В 30x0,8 и ФСП-Люкс 15x0,3 наблюдается как положительные, так и отрицательные расхождения между расчетными и экспериментальными значениями усадки при твердении за счет, по-видимому, случайных погрешностей эксперимента. При этом относительные отклонения экспериментальных значений от расчетных в основном составляет $\pm (2,5 \div 9,6)\%$ (при отклонении одного значения на 22,1%), что в основном соизмеримо с погрешностями измерений. В связи с этим можно считать, что в среднем расчетные и экспериментальные значения усадки на этих типах фибры с учетом погрешностей эксперимента статистически совпадают.

У фибробетонов с фиброй остальных типов (Нагех 32 x 1,2, ФСЛ 40x0,8 и ФСП-А 30x0,3) экспериментальная усадка превышает расчетную усадку в 1,05÷1,57 раза (на 5÷57%). Это может быть связано с формированием при изготовлении образцов из бетонов с такой фиброй структуры цементного камня, отличающегося от структуры цементного камня без фибры и с фиброй других типов. Судя по данным работы [13] плотность фибробетона может

существенно отличаться от расчетной – рассчитанной по плотности матрицы, полученной на образцах без фибры и плотности фибры. В связи с эти матрица фибробетона может отличаться несколько меньшей плотностью, чем матрицы без фибры и поэтому претерпевать при твердении несколько большую усадку, чем без фибры.

Результаты сравнения расчетной и экспериментальной плотности различных исследованных составов фибробетонов по данным работы [13], а также сравнения усадки матрицы без фибры и фактической усадки матрицы этих составов, вычисленной по рассматриваемой модели, исходя из равенства расчетной и экспериментальной усадки, приведены в табл. 4. Построенные на основе этой таблицы зависимость отношения экспериментальной линейной усадки к расчетной от разницы между расчетной и фактической плотностью фибробетона при $C_f > D$ и зависимость расчетной фактической линейной усадки матрицы фибробетона от разницы между расчетной и фактической плотностью фибробетона приведены на рис. 6 и 7.

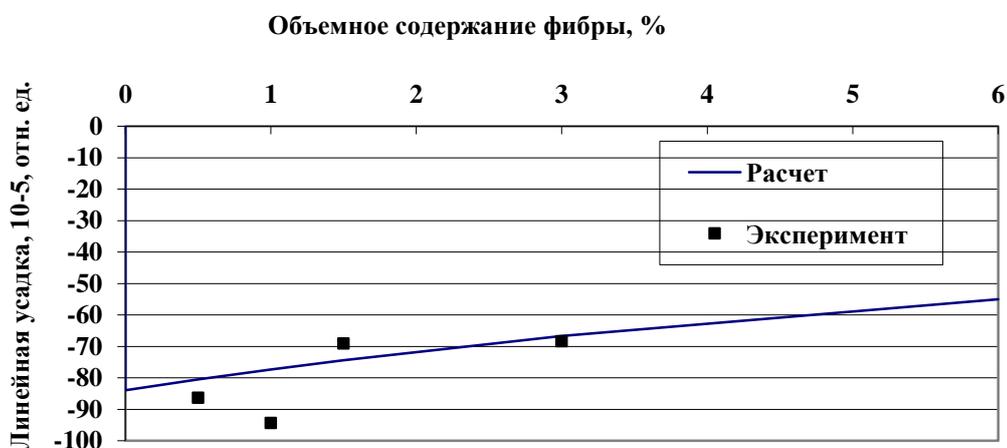


Рисунок 1. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСП-В 30x0,8 от объемного содержания фибры при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

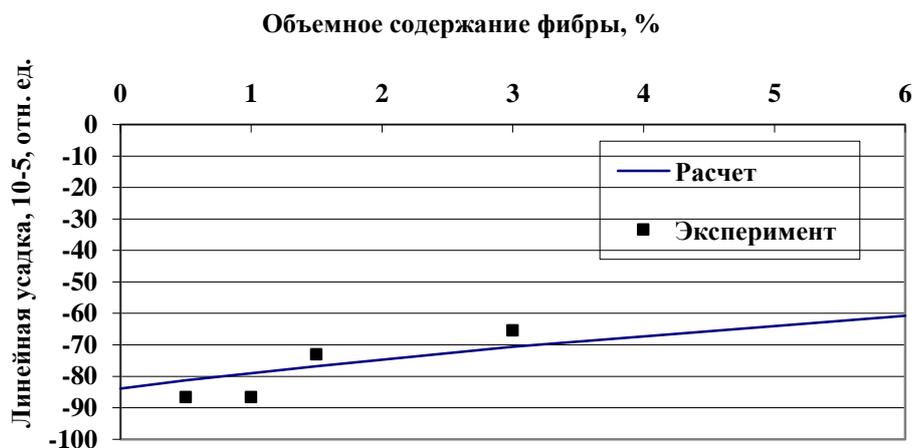


Рисунок 2. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСП-Люкс 15x0,3 от объемного содержания фибры при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

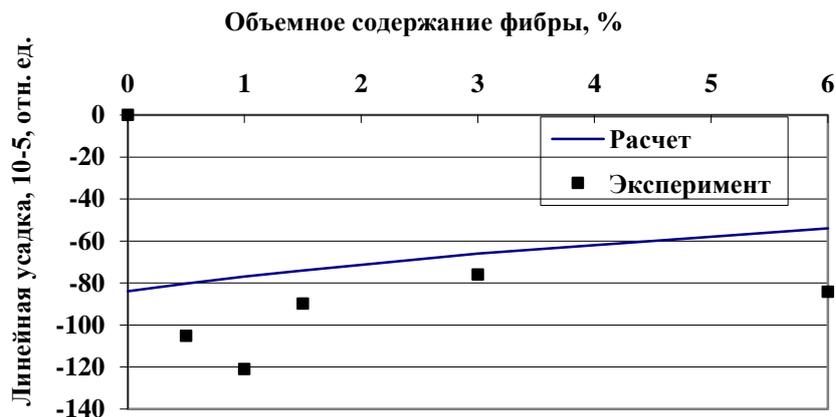


Рисунок 3. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй Harex 32x1.2 от объемного содержания фибры при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

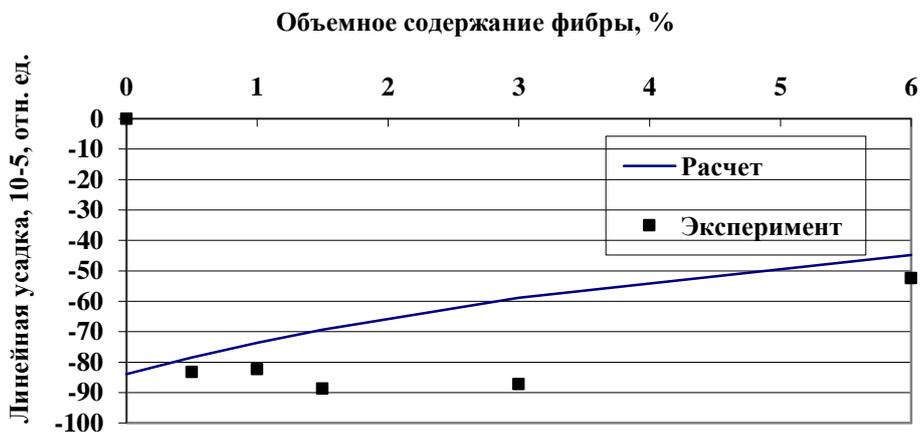


Рисунок 4. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСЛ 40x0.8 от объемного содержания фибры при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

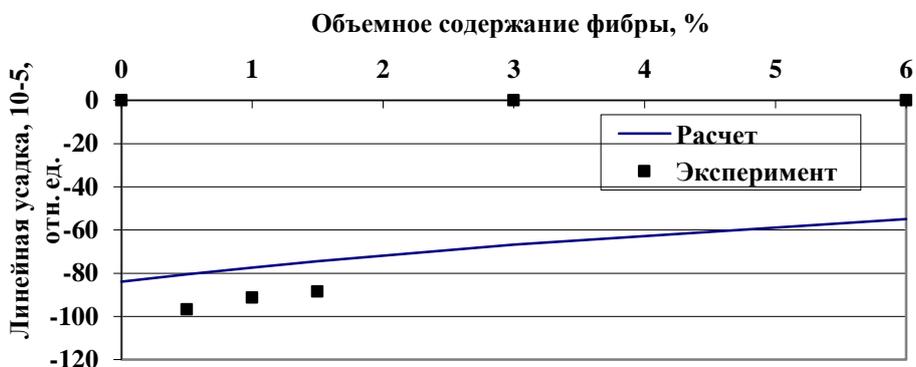


Рисунок 5. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСП-А 30x0.3 от объемного содержания фибры при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

Таблица 4

Результаты сравнения расчетной и экспериментальной плотности различных исследованных составов фибробетонов по данным работы [13], а также сравнения усадки матрицы без фибры и фактической усадки матрицы этих составов, вычисленной по рассматриваемой модели, исходя из равенства расчетной и экспериментальной усадки

№ состава	Основные признаки состава		C _f , мм	Линейная усадка, 10 ⁻⁵ отн. ед.		Отношение экспериментальной усадки к расчетной	Плотность, кг/м ³		Разница между расчетной и фактической плотностью	Линейная усадка матрицы, 10 ⁻⁵ отн. ед.	
	Тип фибры	Содержание фибры μ _{фб} , %		Экспериментальная	Расчетная		Расчетная	Фактическая		Экспериментальная без фибры	Фактическая рассчитанная по модели
1	-	0	0	-83,9	-83,9	1	2320	2320	0	-83,9	-
2	ФСП-В 30x0,8	0,5	12,1	-86,4	-80,5	1,07	2348	2335	13	-83,9	-90
3		1	8,6	-94,4	-77,3	1,23	2375	2400	-25	-83,9	-103
4		1,5	7,0	-69,1	-74,4	0,93	2402	2435	-33	-83,9	-78
5		3	4,9	-68,4	-66,7	1,02	2483	2500	-17	-83,9	-86
6		6	-	-	-55	-	2649	-	-	-	-
7		0,5	5,3	-83,9	-83,9	1,0	2348	2310	38	-83,9	-89
8	ФСП-Люкс 15x0,3	1	3,8	-77,6	-81,3	0,98	2375	2375	0	-83,9	-82
9		1,5	3,1	-86,6	-79	0,95	2402	2365	37	-83,9	-80
10		3	2,2	-73	-76,8	0,93	2483	2470	13	-83,9	-78
11		6	1,5	Чистый случай при C _f :D			2649	2515	134	-83,9	-
12		0,5	18,2	-105,3	-80,3	1,31	2348	2300	48	-83,9	-110
13	Нарех 32x1,2	1,0	12,8	-121,1	-77,0	1,57	2375	2350	25	-83,9	-132
14		1,5	10,5	-89,8	-74	1,22	2402	2290	112	-83,9	-102
15		3	7,4	-76	-66	1,16	2483	2410	73	-83,9	-97
16		6	5,2	-84,3	-54	1,56	2649	2580	69	-83,9	-131
17	ФСЛ 40x0,8	0,5	10,0	-83,2	-78,5	1,06	2348	2280	68	-83,9	-89
18		1	7,0	-82,3	-73,7	1,13	2375	2335	40	-83,9	-95
19		1,5	5,8	-88,7	-69,4	1,28	2402	2395	7	-83,9	-107
20		3	4,1	-87,2	-58,9	1,48	2483	2410	73	-83,9	-124
21		6	2,9	-52,4	-44,8	1,17	2649	2650	-1	-83,9	-98
22	ФСП-А 30x0,3	0,5	4,5	-96,7	-80,5	1,20	2348	2340	8	-83,9	-101
23		1	3,2	-91,3	-77,4	1,18	2375	2350	25	-83,9	-99
24		1,5	2,6	-88,4	-74,4	1,19	2402	2395	7	-83,9	-99,7
25		3	1,8	Чистый случай при C _f :D			2483	-	-	-83,9	-
26		6	1,3	Чистый случай при C _f :D			2649	-	-	-83,9	-

Как видно из табл. 5 в большинстве случаев фактическая плотность образцов исследованных в работе [13] составов фибробетона ниже расчетной величины. Причем разница между расчетной и фактической плотностью Δγ составляет до 134 кг/м³. Хотя фактическая плотность некоторых составов выше расчетной плотности до 33 кг/м³.

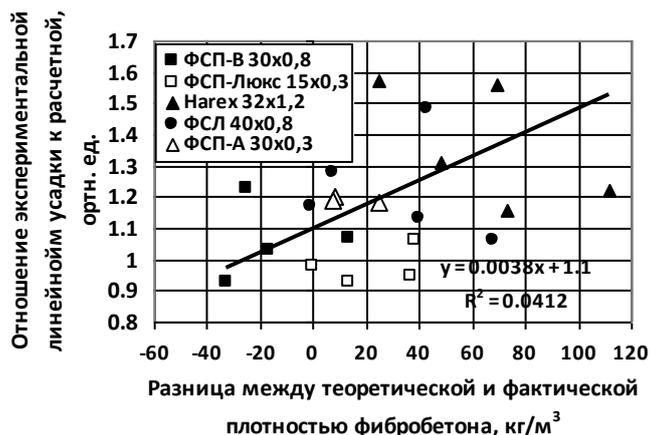


Рисунок 6. Зависимость отношения экспериментальной линейной усадки к расчетной от разницы между расчетной и фактической плотностью фибробетона при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

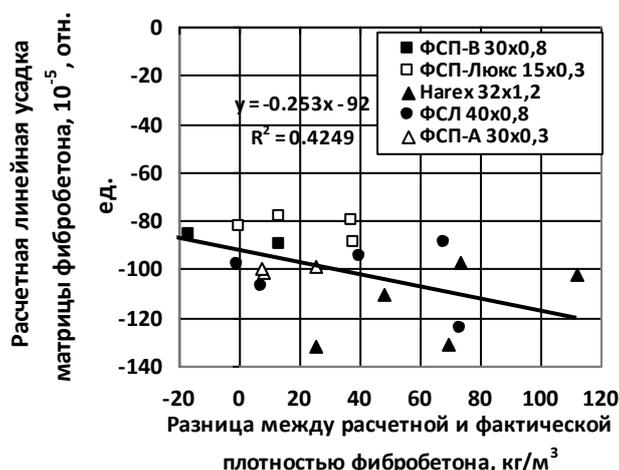


Рисунок 7. Зависимость расчетной линейной усадки матрицы фибробетона от разницы между расчетной и фактической плотностью фибробетона при $C_f > D$ (составлено/разработано автором)

Из рис. 6 и 7 следует, что между разницей $\Delta \rho$ при $C_f > D$ и отношением экспериментальной линейной усадки фибробетонов к расчетной, а также между $\Delta \rho$ при $C_f > D$ и расчетной фактической линейной усадкой матрицы фибробетона наблюдается корреляция. И хотя статистическая значимость этих корреляций из-за наличия и суммирования случайных погрешностей не является очевидной (из-за низких значений r^2), наличие таких корреляций графически просматривается. Это можно считать доказательством, что основной причиной различий между расчетными экспериментальными значениями усадки у фибробетонов с фиброй Негех 32x1,2, ФСЛ 40x0,8 и ФСП-А 30x0,3 при $C_f > D$ является заниженная плотность матрицы, и поэтому ее более значительная усадка вследствие особого влияния фибры этих типов на формирование структуры фибробетона.

Результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной в работах [2, 3] для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным работ [8, 9] исследования усадки при твердении различных составов для случая $C_f \leq D$ приведены на рис. 8 и 9.

Из рис. 8 и 9 следует, что при использовании в расчетах величину прочности на растяжение $R_{p,цк}=5$ МПа (как у матрицы) расчетная усадка в 5 – 7 раз ниже экспериментальной, так как по-видимому в соответствии с моделью при такой прочности будут образовываться значительные трещины в армированных фиброй прослойках цементного камня, которые значительно снижают усадку прослоек.

Из этого был сделан вывод, что в действительности эффективная прочность цементного камня фибробетона в рамках рассмотренной модели значительно выше, принятой величины, равной прочности на растяжение растворной матрицы.

Действительно, по результатам расчетов в среднем расчетные и экспериментальные значения усадки совпадают, как это показано на рис. 8 и 9, если в расчетах вместо $R_{p,цк}=5$ МПа использовать в среднем $R_{p,цк}=30$ МПа (26 МПа при $\mu_{fv}=1,5\%$, 34 МПа при $\mu_{fv}=3\%$ и $\mu_{fv}=6\%$) для сталефибробетона с фиброй ФСП-Люкс 15x0.3 и $R_{p,цк}=34$ МПа (31 МПа при $\mu_{fv}=1\%$ и 37 МПа при $\mu_{fv}=1,5\%$) для сталефибробетона с фиброй ФСП-А 30x0.3.

Таким образом, при использовании для фибробетона при $C_f \leq D$ предложенной в работах модели [8, 9] прочность на растяжение цементного камня фибробетона нужно принимать в 5 – 7 раз выше прочности на растяжение раствора-матрицы.

То, что прочность тонких (доли мм) прослоек цементного камня между песчинками раствора матрицы может быть действительно значительно выше прочности, полученных на образцах в сотни раз больших размеров, используемых при механических испытаниях цементного камня, вполне возможно. В соответствии с теорией прочности Вейбулла с уменьшением размеров образцов материалов их прочность увеличивается вследствие уменьшения вероятности присутствия в них дефектов, снижающих прочность. Кроме того прочность цементного камня, принимаемая в данном случае по прочности матрицы также может быть выше прочности раствора.

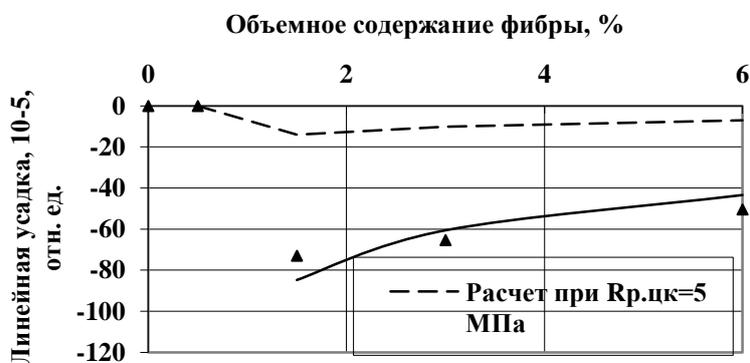


Рисунок 8. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСП-Люкс 15x0.3 от объемного содержания фибры при $C_f < d_{cp}$ и $C_f \approx D$ (составлено/разработано автором)



Рисунок 9. Зависимость расчетной и экспериментальной линейной усадки при твердении сталефибробетона с фиброй ФСП-А 30х0.3 от объемного содержания фибры при $C_f < d_{cp}$ и $C_f \approx D$ (составлено/разработано автором)

Выводы

1. Результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки различных составов при твердении показали принципиальную возможность ее использования в расчетах деформаций фибробетонов вследствие деформаций их компонентов.
2. Вместе с тем при использовании этой модели необходимо учитывать следующие поправки:
 - 2.1. Структура, плотность и деформации матрицы в составе фибробетона могут несколько отличаться от этих параметров у матрицы без фибры. В связи с этим при расчетах деформаций фибробетона необходимо вводить поправку, зависящую от разницы между теоретической (рассчитанной по технологическому составу) и фактической плотностью, установленную в настоящей работе.
 - 2.2. Прочность на растяжение тонких прослоек цементного камня между песчинками в матрице фибробетона выше прочности на растяжение цементного камня и раствора-матрицы вследствие влияния масштабного эффекта на прочность. В связи с этим при расчетах деформаций фибробетона необходимо использовать прочность цементного камня на растяжение в 5 - 7 раз выше прочности раствора-матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красновский Р.О., Денисов А.В., Рогачев К.В. Фибробетон - новый материал для строительства АЭС». "Энергетик" №12, 2013. М.: Энергетик, 2013, С. 46-47.
2. Рогачев К.В., аспирант ИГЭС Научный руководитель – Денисов А.В., канд. тех. наук, доц., проф. ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» Модель структуры фибробетона для аналитического определения его термических и радиационных изменений. Строительство – формирование среды жизнедеятельности Сборник трудов Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов,

- аспирантов и молодых ученых (22–24 апреля 2015 г., Москва). ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2015. с. 407-411.
3. Денисов А.В., Рогачев К.В. Влияние параметров дисперсного армирования фибробетона на аналитическое определение его термических и радиационных изменений. Строительство и реконструкция. 2015. №4 (60). С. 16-22.
 4. Музалевский Л.П. Радиационные изменения тяжелых бетонов и метод их аналитического определения. Кандидатская диссертация, МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1989.
 5. Музалевский Л.П. Прогнозирование степени изменения прочности и радиационных деформаций бетона // Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, том, У, Труды Третьей Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. 27-29 октября 1985 г. Тбилиси, Из-во ТГУ, Тбилиси: 1985, с. 116-125.
 6. Денисов А.В., Дубровский В.Б., Музалевский Л.П. Прогнозирование радиационных изменений неорганических строительных материалов Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование и строительство. 1990. Вып. 3. С. 98 - 102.
 7. Денисов А.В., Дубровский В.Б., Соловьев В.Н. Радиационная стойкость минеральных и полимерных строительных материалов. Справочное пособие. М.: «Издательский дом МЭИ», 2012. 384 с.
 8. Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Рогачев К.В. Зависимость усадки сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей от типа фибры и процента армирования. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 4 (29). www.vestnik.vgasu.ru.
 9. Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Рогачев К.В., Горбунов И.А., Денисов А.В. Влияние содержания и характеристик фибры на усадку сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей. (Доклад на III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. Секция Фибробетона и армоцементы». 12-16 мая 2014). Бетон и железобетон - взгляд в будущее. III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону. 12-16 мая 2014. Т. II. С. 585-591.
 10. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Горбунов И.А., Рогачев К.В., Денисов А.В. «Влияние на прочность сталефибробетона содержания фибры и ее характеристик» Международная научная конференция "Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании" Москва: МГСУ, 2013, с. 579-585.
 11. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1974. 286 с.
 12. Рабинович, Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. - М.: Стройиздат, 1989. 174 с.
 13. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Рогачев К.В., Денисов А.В., Горбунов И.А. «Влияние типа и содержания фибры на плотность сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей» "Технологии бетонов" №3 (92), 2014. М.: Технологии бетонов, 2014, вып. №3 с. 30-34.

Denisov Aleksandr Viktorovich

National research Moscow state university of civil engineering, Russia, Moscow
E-mail: den-al-v@inbox.ru

Rogachev Konstantin Viktorovich

JSC «Istitute «Orgenergostroy», Russia, Moscow
E-mail: Kost.rog.86@gmail.com

Ivanenko Svetlana Vladimirovna

JSC «Design studio «Format», Russia, Moscow
E-mail: swetlanaivanenko@gmail.com

The results validate the model fiber-reinforced concrete structure, designed for the analytical determination of its thermal and radiation changes from the experimental data of shrinkage during curing

Abstract. The article is devoted to the development and validation of analytical models of fiber-reinforced concrete structure, designed for the analytical determination of its thermal and radiation changes. We describe the stress-strain state of the fiber-reinforced concrete, shrinkage occurs when the cement stone. This article discusses two approaches to describe the stress-strain state of fiber-reinforced concrete, depending on its structure. Experimental and theoretical determination of shrinkage fiber-reinforced concrete, considered different types of fibers: chopped wavy wire, machined from slab to anchor a limb at the ends of the fibers, variable profile cut from a steel sheet, chopped wire with anchors at the ends; and different reinforcement percentages: 0.5%, 1.0%, 1.5%, 3.0%, 6.0%. The article presents the results of the comparison of the calculated and experimental density of fiber-reinforced concrete of various compositions, as well as a comparison matrix without shrinkage fiber and actual shrinkage of the matrix of these compounds, calculated by the model. The result of model validation fiber-reinforced concrete structure, designed for the analytical determination of its thermal and radiation changes from the experimental data of various compositions shrinkage during curing is confirmed in principle the possibility of its use in the calculation of fiber-reinforced concrete strain due to deformation of the components.

Keywords: fiber reinforced concrete; texture; shrinkage; analytical model; cement; steel fiber reinforced concrete; radiation resistance; thermal resistance; density

REFERENCES

1. Krasnovskij R.O., Denisov A.V., Rogachev K.V. Fibrobeton - novyj material dlja stroitel'stva AJeS». "Jenergetik" №12, 2013. M.: Jenergetik, 2013, S. 46-47.
2. Rogachev K.V., aspirant IGJeS Nauchnyj rukovoditel' – Denisov A.V., kand. teh. nauk, doc., prof. FGBOU VPO «Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet» Model' struktury fibrobeta dlja analiticheskogo opredelenija ego termicheskikh i radiacionnyh izmenenij. Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedejatel'nosti Sbornik trudov Vosemnadcatoj Mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh (22–24 aprelja 2015 g., Moskva). FGBOU VPO «MGSU», 2015. s. 407-411.

3. Denisov A.V., Rogachev K.V. Vlijanie parametrov dispersnogo armirovanija fibrobetona na analiticheskoe opredelenie ego termicheskikh i radiacionnyh izmenenij. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*. 2015. №4 (60). S. 16-22.
4. Muzalevskij L.P. Radiacionnye izmenenija tjazhelyh betonov i metod ih analiticheskogo opredelenija. Kandidatskaja dissertacija, MISI im. V.V. Kujbysheva, 1989.
5. Muzalevskij L.P. Prognozirovanie stepeni izmenenija prochnosti i radiacionnyh deformacij betona // *Zashhita ot ionizirujushhijh izluchenij jaderno-tehnicheskikh ustanovok*, tom, U, Trudy Tret'ej Vsesojuznoj nauchnoj konferencii po zashhite ot ionizirujushhijh izluchenij jaderno-tehnicheskikh ustanovok. 27-29 oktjabrja 1985 g. Tbilisi, Iz-vo TGU, Tbilisi: 1985, s. 116-125.
6. Denisov A.V., Dubrovskij V.B., Muzalevskij L.P. Prognozirovanie radiacionnyh izmenenij neorganicheskikh stroitel'nyh materialov *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Ser. Proektirovanie i stroitel'stvo. 1990. Vyp. 3. S. 98 - 102.
7. Denisov A.V., Dubrovskij V.B., Solov'ev V.N. Radiacionnaja stojkost' mineral'nyh i polimernyh stroitel'nyh materialov. *Spravochnoe posobie*. M.; «Izdatel'skij dom MJeI», 2012. 384 s.
8. Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Rogachev K.V. Zavisimost' usadki stalefibrobetona s cementno-peschanoj matricej ot tipa fibry i procenta armirovanija. *Internet-vestnik VolgGASU*. Ser.: Politematicheskaja. 2013. Vyp. 4 (29). www.vestnik.vgasu.ru.
9. Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Rogachev K.V., Gorbunov I.A., Denisov A.V. Vlijanie sodержanija i harakteristik fibry na usadku stalefibrobetona s cementno-peschanoj matricej. (Doklad na III Vseroscijskoj (II Mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu. Sekcija Fibrobetony i armocementy». 12-16 maja 2014). *Beton i zhelezobeton - vzgljad v budushhee. III Vseroscijskaja (II Mezhdunarodnaja) konferencija po betonu i zhelezobetonu*. 12-16 maja 2014. T. II. C. 585-591.
10. Dorf V.A., Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Gorbunov I.A., Rogachev K.V., Denisov A.V. «Vlijanie na prochnost' stalefibrobetona sodержanija fibry i ee harakteristik» *Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija "Integracija, partnerstvo i innovacii v stroitel'noj nauke i obrazovanii"* Moskva: MGSU, 2013, s. 579-585.
11. Rzhavskij V.V., Novik G.Ja. *Osnovy fiziki gornih porod*. M.: Nedra, 1974. 286 s.
12. Rabinovich, F.N. *Dispersno armirovannye betony / F.N. Rabinovich*. - M.: Strojizdat, 1989. 174 s.
13. Dorf V.A., Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Rogachev K.V., Denisov A.V., Gorbunov I.A. «Vlijanie tipa i sodержanija fibry na plotnost' stalefibrobetonov s cementno-peschanoj matricej» *"Tehnologii betonov"* №3 (92), 2014. M.: Tehnologii betonov, 2014, vyp. №3 s. 30-34.