

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА  
ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФИБРОБЕТОНОВ  
С АГРЕГИРОВАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОЛОКОН**

*Л. Р. Маилян, Э.С. Айвазян*

*Ростовский государственный строительный университет*

Для возможности практического внедрения фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по челночной и по конвейерной технологии [1], и железобетонных конструкций из них необходимо располагать расчетными величинами основных прочностных, деформативных и конструктивных характеристик, а также расчетными диаграммами деформирования фибробетонов, разработка теоретических предложений по которым и осуществлена в настоящей статье.

Ранее [1] нами было установлено практически одинаковое изменение прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования фибробетонов с агрегированным распределением волокон независимо от технологии – как челночной, так и конвейерной.

Поэтому все расчетные предложения ниже носят обобщенный характер и делаются для фибробетонов, изготовленных по любой из этих новых технологий.

**Нормативные и расчетные характеристики фибробетонов с агрегированным распределением волокон.** После установления изменения характеристик фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по челночной или конвейерной технологии в первую очередь необходима разработка рекомендаций по расчетному определению их нормативных и расчетных сопротивлений для нормированного расчета по предельным состояниям I и II групп.

Для этого необходима определенная статистика, основанная на большом количестве экспериментальных данных.

С этой целью были проведены дополнительные экспериментальные исследования – изготовлено и испытано 80 кубов размером  $10 \times 10 \times 10$  см из фибробетона, приготовленного по челночной и конвейерной технологиям, из которых по 40 испытывались на осевое сжатие и растяжение при раскалывании.

По результатам статистической обработки опытных данных были определены нормативные сопротивления сжатию и растяжению при надежности 0,95. Их значения, являющиеся одновременно расчетными сопротивлениями для предельных состояний второй группы  $R_{b,ser}$  и  $R_{bt,ser}$  для фибробетонов класса В 30 с процентом фибрового армирования  $\mu=4\%$  (примером является таблица 1).

Расчетные сопротивления фибробетонов для предельных состояний первой группы  $R_b$  и  $R_{bt}$  получали как частное от деления нормативных сопротивлений сжатию и растяжению на соответствующие коэффициенты надежности по бетону при сжатии  $\gamma_{bc} = 1,3$  и при растяжении  $\gamma_{bt} = 1,5$ .

При расчете и проектировании фибробетонных элементов необходимо учитывать также деформативность тяжелых фибробетонов.

При обычной технологии изготовления фибробетонов с произвольной ориентацией волокон при  $\mu=4\%$  их предельную сжимаемость можно принимать при кратковременном нагружении равной  $260 \cdot 10^{-5}$ , а предельную растяжимость –  $30 \cdot 10^{-5}$ . Другими словами, предельная сжимаемость увеличивается в 1,3 раза, а предельная растяжимость – в 1,5 раза по сравнению с нормированными значениями для бетона без фибр.

Для фибробетонов же с агрегированным распределением волокон, изготовленных по челночной и конвейерной технологиям, при  $\mu=4\%$ , предельную сжимаемость можно принимать при кратковременном нагружении равной  $235 \cdot 10^{-5}$ , а предельную растяжимость –  $27 \cdot 10^{-5}$ . Другими словами, предельная сжимаемость и растяжимость фибробетонов

при челночной или конвейерной технологии снижается на 10% по сравнению с обычной технологией.

Таблица № 1

Рекомендуемые значения нормативных и расчетных характеристик фибробетона класса В 30 с процентом фибрового армирования  $\mu=4\%$  с агрегированным распределением волокон

Вид сопротивления	Нормативные и расчетные характеристики, МПа		
	нормативные сопротивления $R_{bn}, R_{btn}$ или расчетные сопротивления II группы $R_{b,ser} R_{bt,ser}$	расчетные сопротивления I группы $R_b, R_{bt}$	начальные модули упругости $E_{b(bt)} 10^{-3}$
Сжатие осевое	29,7	22,8	3,57
Растяжение осевое	3,0	2,0	3,57

**Предложения по расчетной оценке прочностных и деформативных характеристик фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по челночной и конвейерной технологиям,**

**в различные сроки твердения.** Разработанные нами расчетные предложения сводятся к рекомендациям по аналитическому описанию коэффициентов изменения прочностных и деформативных характеристик фибробетонов *в зависимости от возраста бетона* в виде:

$$K = f(t), \quad (1)$$

где  $f$  – соответствующая функция;  $t$  – возраст фибробетонов.

За единую базовую функцию  $f(t)$  в формуле (1) примем зависимость П. Сарджина, рекомендованную ЕКБ-ФИП [2] для описания диаграмм деформирования бетона:

$$\frac{Y}{Y_R} = \frac{K\left(\frac{X}{X_R}\right) - \left(\frac{X}{X_R}\right)^2}{1 + (K - 2)\left(\frac{X}{X_R}\right)}, \quad (2)$$

где  $X_R, Y_R$  – координаты максимума графика функции (2) в абсолютных показателях;  $K$  – управляющий параметр, влияющий на форму графика функции (2), трансформирующегося в прямую ( $K=1$ ), квадратичную параболу ( $K=2$ ) и действительную ветвь квадратичной гиперболы ( $1 < K < 2$  и  $K > 2$ ).

В качестве функции  $Y/Y_R$  в выбранной нами функции (2) выступают приращения  $\Delta$  прочностных  $R_b, R_{bt}$  и деформативных  $\varepsilon_{bR}, \varepsilon_{btR}$  характеристик, а также начального модуля упругости  $E_b=E_{bt}$  фибробетонов, приготовленных по челночной технологии, а в качестве аргумента  $X/X_R$  – относительный возраст фибробетона  $t/28$ , то есть возраст в сутках, отнесенный к базовому – 28 суток.

Статистическая обработка полученных результатов позволила определить значения значений управляющих параметров  $K$  для прочностных  $R_b, R_{bt}$ , деформативных  $\varepsilon_{bR}, \varepsilon_{btR}$  характеристик и начального модуля упругости  $E_b=E_{bt}$  фибробетонов, изготовленных по челночной и конвейерной технологиям и проанализировать их.

Анализ показал, что значения управляющих параметров  $K$  для прочностных  $R_b, R_{bt}$ , деформативных  $\varepsilon_{bR}, \varepsilon_{btR}$  характеристик и начального модуля упругости  $E_b=E_{bt}$  фибробетонов, изготовленных как по челночной, так и по конвейерной технологиям, достаточно близки между собой.

Это дало основания рекомендовать единые обобщенные значения управляющих параметров  $K$  для фибробетонов с агрегированным распределением волокон, независимо от технологии их производства.

Таблица 2

Функции, аргументы и значения параметров зависимости (2) для определения прочностных и деформативных характеристик фибробетонов при челночной технологии изготовления и в разные сроки твердения

Вид фибробетона	Вид функции	Функция	Аргумент	Значения параметров К при сжатии и растяжении
Фибробетон с агрегированным распределением фибр	$K_R = f(t)$	$K_R$	$t$	3,46
	$K_{\varepsilon_R} = f(t)$	$K_{\varepsilon_R}$	$t$	3,58
	$K_E = f(t)$	$K_E$	$t$	3,25

Анализ показал хорошую сходимость разработанных теоретических рекомендаций с нашими экспериментальными результатами.

**Аналитическое описание диаграмм деформирования "напряжения-деформации" при сжатии и растяжении фибропенобетонов, с агрегированным распределением волокон, изготовленных по челночной и конвейерной технологиям, в различные сроки твердения и их взаимосвязь.** Одной из наиболее удобных и распространенных в мире зависимостей для описания диаграмм деформирования бетона как при сжатии, так и при растяжении, является функция, предложенная П. Сарджином, и рекомендованная ЕКБ-ФИП для расчетов железобетонных конструкций:

$$\frac{\sigma}{R} = \frac{K \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right)^2}{1 + (K - 2) \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right)}, \quad (3)$$

где  $R$  и  $\varepsilon_R$  – максимальная прочность и соответствующие ей деформации на сжатие или растяжение;  $K = \varepsilon_R E / R$  – численный параметр, равный

отношению начального  $E$  (касательного) модуля упругости к предельному (секущему) модулю упругости  $R/\varepsilon_R$  в момент достижения максимума функции (3) с координатами  $R$  и  $\varepsilon_R$ .

В тех же рекомендациях предлагалось принимать диаграммы деформирования бетона при сжатии « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и при растяжении « $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ » подобными, имеющими одинаковый начальный  $E_b = E_{bt}$  и секущий модуль упругости  $R_b/\varepsilon_{bR} = R_{bt}/\varepsilon_{btR}$ , как и параметр  $K$ .

В целях единообразия предлагаемых расчетных зависимостей, применим единые функции (2) – (3) как для оценки изменения прочностных и деформативных характеристик, так и для описания диаграмм деформирования фибробетонов в различные сроки твердения и как при сжатии, так и при растяжении.

В целом, **порядок расчетной оценки характеристик и диаграмм деформирования** фибробетонов с агрегированным распределением волокон как при челночной, так и при конвейерной технологии их изготовления имеет следующий вид.

На первом этапе определяется **изменение прочностных  $\Delta R_b$  и  $\Delta R_{bt}$  и деформативных  $\Delta \varepsilon_{bR}$ ,  $\Delta \varepsilon_{btR}$ ,  $\Delta E_b$ ,  $\Delta E_{bt}$  характеристик** при необходимых сроках твердения при сжатии и растяжении – по зависимости (2) или таблице 2.

На втором этапе производится **аналитическое описание диаграмм « $\sigma-\varepsilon$ » фибробетона** с агрегированным распределением волокон при сжатии и растяжении в различные сроки твердения – используется функция (3) с подстановкой в нее вместо  $R$  и  $\varepsilon_R$  соответственно  $(R_b + \Delta R_b)$ ;  $(\varepsilon + \Delta \varepsilon_{bR})$ ;  $\Delta E_b$ , при сжатии и  $(R_{bt} + \Delta R_{bt})$ ;  $(\varepsilon_{btR} + \Delta \varepsilon_{btR})$ ;  $\Delta E_{bt}$  при растяжении, при этом параметр  $K$ :

$$K = \frac{(\varepsilon_{bR} + \Delta \varepsilon_{bR})(E_{bR} + \Delta E_b)}{(R_b + \Delta R_b)} = \frac{(\varepsilon_{btR} + \Delta \varepsilon_{btR})(E_{bt} + \Delta E_{bt})}{(R_{bt} + \Delta R_{bt})} \quad (4)$$

Анализ показал хорошую сходимость опытных и расчетных результатов.

**Взаимосвязь изменения диаграмм деформирования** фибробетонов при сжатии и растяжении обычно наиболее просто и достоверно отражена в уже упоминавшихся рекомендациях ЕКБ – ФИП – в них принимается равенство начальных модулей упругости при сжатии и растяжении  $E_b = E_{bt}$ , то есть касательных к диаграммам « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ » в начале координат и рекомендуется одинаковое значение параметра при сжатии и растяжении

$$K_b = \frac{\varepsilon_{bR} E_b}{R_b} = \frac{\varepsilon_{btR} E_{bt}}{R_{bt}} = K_{bt} \quad (5)$$

то есть секущих в точках максимумов диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ », а также дается одинаковая функция “ $\sigma - \varepsilon$ ” при сжатии и растяжении – формула (3).

Тем самым диаграммы при сжатии и растяжении предполагаются подобными.

Анализ полученных нами опытных данных выявил дополнительные факты взаимосвязи изменения диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ » при сжатии и растяжении фибробетонов с агрегированным распределением волокон, приготовленных как по челночной, так и по конвейерной технологии.

Это касается координат максимумов диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ » при любом определенном сроке твердения - оказалось, что они лежат при сжатии и растяжении на одной прямой, проходящей через начало координат графика.

То есть, подобие диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ » при сжатии и растяжении имеет место и для фибробетонов с агрегированным распределением волокон, приготовленных как по челночной, так и по конвейерной технологии, в любые сроки твердения.

### **Выводы**

1. По результатам статистической обработки опытных данных при надежности 0,95 определены и рекомендованы для применения при проектировании значения нормативных сопротивлений на сжатие и растяжение  $R_{bn}$  и  $R_{btm}$  фибробетонов класса В 30 при проценте фибрового армирования 4% с агрегированным распределением волокон, изготовленных по предложенным челночной и конвейерной технологиям, а также расчетных

сопротивлений для предельных состояний первой  $R_b$  и  $R_{bt}$  и второй группы  $R_{b,ser}$  и  $R_{bt,ser}$ .

2. Предложены расчетные зависимости для определения прочностных и деформативных характеристик при осевом сжатии и растяжении фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по предложенным челночной и конвейерной технологиям, в любом возрасте от 7 до 365 суток, определены их параметры и коэффициенты.

3. Предложено использовать для расчетного описания диаграмм деформирования «напряжения-деформации» в любом возрасте при осевом сжатии и растяжении фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по предложенным челночной и конвейерной технологиям, формулу ЕКБ – ФИП с учетом разработанных рекомендаций по оценке изменения их прочностных и деформативных характеристик.

4. Выявлена взаимосвязь изменений прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования при осевом сжатии и растяжении фибробетонов с агрегированным распределением волокон, изготовленных по предложенным челночной и конвейерной технологиям, в различном возрасте.

Предложена расчетная зависимость для описания этой взаимосвязи, имеющая в целях единообразия, одинаковый вид и структуру с расчетными рекомендациями, разработанными для определения характеристик фибробетона и его диаграмм деформирования.

### **Литература**

1. Маилян, Л.Р., Налимова, А.В., Маилян, А.Л., Айвазян, Э.С. Челночная технология изготовления фибробетона с агрегированным распределением фибр и его конструктивные свойства. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/714> (доступ свободный)- Загл. с экрана.-Яз. рус.



2. Кузнецова, О.В., Лазарева, Е.А., Тышлангян, Ю.С. Композиционные разработки в технологии производства. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1628> (доступ свободный) -Загл. с экрана.-Яз.рус.

3. Кодекс-образец ЕКБ – ФИП для норм по железобетонным конструкциям. [Текст] / Пер. с фр. Л.В. Еленской; под ред. А.А Гвоздева. – М.: НИИЖБ, 1984. – 284 с.

4. Аль Хаддад Абдуль Муаеин Хамид Влияние технологических параметров перемешивания на свойства сталефибробетона [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук /Аль Хаддад Абдуль Муаеин Хамид. – Л., 1980. – 20 с.

5. Вылекжанин, В. П. О совместной работе стержневой и фибровой арматуры в изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементах [Текст]: / В. П. Вылекжанин, В. И. Григорьев // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий: сб. науч. тр. – Л.: ЛЕНЗНИИЭП, 1985. – С. 69 - 77.

6. Львовский, Е. Н. Ползучесть сталефибробетона при центральном растяжении [Текст]: / Е. Н. Львовский, Л. И. Ольховая; Кишинев. политехн. ин-т. – Кишинев, 1989– 17 с. – Деп. в МолдНИИНТИ 24. 03. 89, № 1098-М 89.

7. ТУ 1276-001-40610949-95 Фибра стальная для дисперсного армирования бетона / Разработчик ЗАО «Фибробетон»-9 с.

8. Шабловский, Е. А. Стальные фибры для дисперсного армирования бетонных конструкций [Текст]: / Е. А. Шабловский. – М., 1990. – 61 с. – (Серия: Конструкции жилых и общественных зданий. Технология индустриального домостроения: обзор. информ. / ВНИИТАГ; вып. 4).

9. Браутман, Л., Крок, Р. Современные композиционные материалы [Текст]: – М.: Мир, 1970. – 240 с.

10. Properties of fibre reinforced concrete for rigid pavement / T. F. Fwa, P. Paramasivam // Proc. Int. Symp. Fibre Reinforced Concr., Madras, Dec. 16-19, 1987:ISFRC-87. Vol. 2. – Rotterdam, 1987. – P. 5.17 - 5.27.

11. Use of conventional and high performance steel-fiber reinforced concrete for bridge deck overlays / N. Krstulovic – Opara [et al.] // ACI materials journal. –1995. – Vol. 92, № 6. – P. 669 – 671.