

УДК 691.32

И. А. Леонович, А. А. Леонович

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА

Предложена методика расчета начального модуля упругости фибробетона в зависимости от упругих свойств и объемного содержания фибры, которая позволит оптимизировать состав фибробетона для достижения заданных упругих свойств, влияющих на его способность сопротивляться статическому и ударному нагружению. Получены графики ожидаемого модуля упругости фибробетона в пределах наиболее распространенного объемного содержания стальной, стеклянной и полипропиленовой фибры.

Фибробетон – конструкционный материал, получаемый на основе мелкозернистого бетона, армированного тонкодисперсным волокном или сечкой (фиброй), что позволяет в большой степени компенсировать главные недостатки бетона – низкую прочность при растяжении и хрупкость разрушения.

Фибробетон успешно применяется в монолитных конструкциях и сборных элементах промышленного и гражданского строительства, при возведении дамб, аэродромов, строительстве дорог, каналов и т. д. По данным [1–5] имеется опыт эффективного применения бетонов с дисперсным армированием для следующих монолитных конструкций и сооружений: автомобильные дороги, промышленные полы, выравнивающие полы, мостовые настилы, ирригационные каналы, взрыво- и взломоустойчивые сооружения, водоотбойные дамбы, огнезащитная штукатурка, емкости для воды и других жидкостей, обделка тоннелей, пространственные покрытия и сооружения, ремонт монолитных конструкций, оборонные сооружения. Эффективно применение фибробетона для следующих сборных элементов и конструкций: железнодорожные шпалы, трубопроводы, балки, ступени, стеновые панели, кровельные панели и черепица, модули плавающих доков, морские сооружения, плиты аэродромных, дорожных, тротуарных покрытий и креплений каналов, карнизные элементы мостов, сваи, элементы пространственных покрытий и сооружений.

По сравнению с обычным бетоном фибробетон имеет в несколько раз более высокую прочность на растяжение и срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, морозостойкость, водонепроницаемость, взломоустойчивость, жаропрочность и жаростойкость, сопротивление кавитации и истиранию. Применение дисперсно-армированного бетона вместо железобетона имеет ряд преимуществ, связанных с лучшей технологичностью при изготовлении и ремонте, снижением материалоемкости, повышением долговечности и межремонтного ресурса. Так, например, технико-экономическая эффективность производства водопропускных труб от замены железобетона на сталефибробетон только за счет снижения трудозатрат составляет 10–12 % без учета более высокой сохранности изделий при транспортировке и монтаже и их более высокой долговечности. При этом может применяться то же оборудование и технологические приемы, что и для конструкций из тяжелого бетона [5]. Однако в РБ и РФ пока не разработаны государственные стандарты по фибробетону, для проектирования используются строительные нормы на бетон и железобетон, ведомственные нормы и рекомендации, стандарты других стран.

Целью работы являются прогнозирование и изучение упругих свойств фибробетона в зависимости от объемного содержания и характера фибры,

влияющие на его деформативные способности, которые важны как на этапе производства при затвердении бетона, так и при его эксплуатации. При статической нагрузке желательна низкая предельная деформативность, при ударной нагрузке – высокая.

Технологический процесс изготовления фибробетона должен обеспечить равномерное распределение фибры в объеме, при этом расположение элементов фибры получается хаотичным и в полной мере упругие и прочностные свойства фибры не используются. Совместность работы бетона и фибры обеспечивается, главным образом, сцеплением по их поверхности. Для некоторых видов фибры, в частности стальной, дополнительное сцепление получается за счет устройства анкеров в виде утолщений или загибов на концах фиброэлементов.

Материалы, применяемые в качестве фибры, были поделены на три класса по величине собственного модуля упругости в сравнении с модулем продольной упругости бетона ($E_c = (0,2...0,25) \cdot 10^5$ МПа): высокомодульную, среднемодульную и низко модульную фибру.

К **высокомодульной фибре** ($E_f > E_c$) относятся волокна углерода ($E = (2...3,5) \cdot 10^5$ МПа), волокна бора ($E = 4,22 \cdot 10^5$ МПа), стальная фибра ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа) и т. п. Наибольшее распространение получила сравнительно недорогая стальная фибра, которая имеет различную конфигурацию и изготавливается штамповкой из листа, резкой из тонкой проволоки, фрезерованием специальных слябов и т. д. Имея прочность на растяжение от 400 до 1100 МПа и высокую по сравнению с бетоном жесткость, при достаточной анкеровке в бетоне стальная фибра может давать максимальный вклад в работу композита при статической нагрузке в стадиях до и после образования трещин.

К **среднемодульной фибре**, упругие свойства которой соизмеримы со свойствами бетона, относятся стекловолокно ($E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа), минеральные волокна.

Для дисперсного армирования бетона используется специальное щелочестойкое стекловолокно, например марки СЦ–6, имеющее нормативное сопротивление растяжению до 1100 МПа. Обычное алюмоборосиликатное стекловолокно растворяется в щелочной среде твердеющего бетона и требует специальной защиты.

К **низкомодульной фибре** ($E_f < E_c$) относятся натуральные волокна (хлопок, дерево и др.), полимерные волокна. Представляет интерес полипропиленовая фибра ($E = (0,04...0,08) \cdot 10^5$ МПа), которая сочетает высокую химическую стойкость, легкость, широкий температурный диапазон применения, неэлектропроводность, радиопрозрачность и довольно высокую механическую прочность – до 500 МПа.

В работе использовалась методика расчета модуля упругости бетона в зависимости от свойств заполнителя и цементного камня [7]. В нашем случае заполнителем служат фиброэлементы, а матричным материалом – мелкозернистый бетон с известными упругими свойствами. Учитывая существенную схематизацию материала, расчет ограничивается наиболее простыми зависимостями, присущими упругой деформации.

Выделим элементарный объем материала вокруг одного фиброэлемента (рис. 1). Тогда объемное содержание фибры можно выразить так:

$$\mu_{об} = \frac{a^3}{A^3}, \quad (1)$$

где a^3 – объем фибры; A^3 – выделенный объем фибробетона.

Рассмотрим два крайних расположения фиброволокна в бетонной матрице по отношению к растягивающей (сжимающей) нагрузке: вдоль и поперек. Сцепление между бетоном и фиброй будем считать идеальным.

Определим модуль упругости слоя I, в котором фибра расположена вдоль приложенной нагрузки (рис. 2).

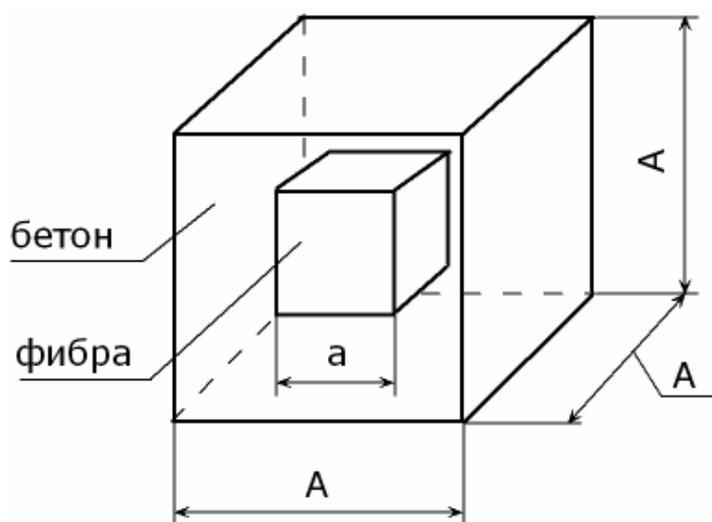


Рис. 1. Объемный элемент фибробетона

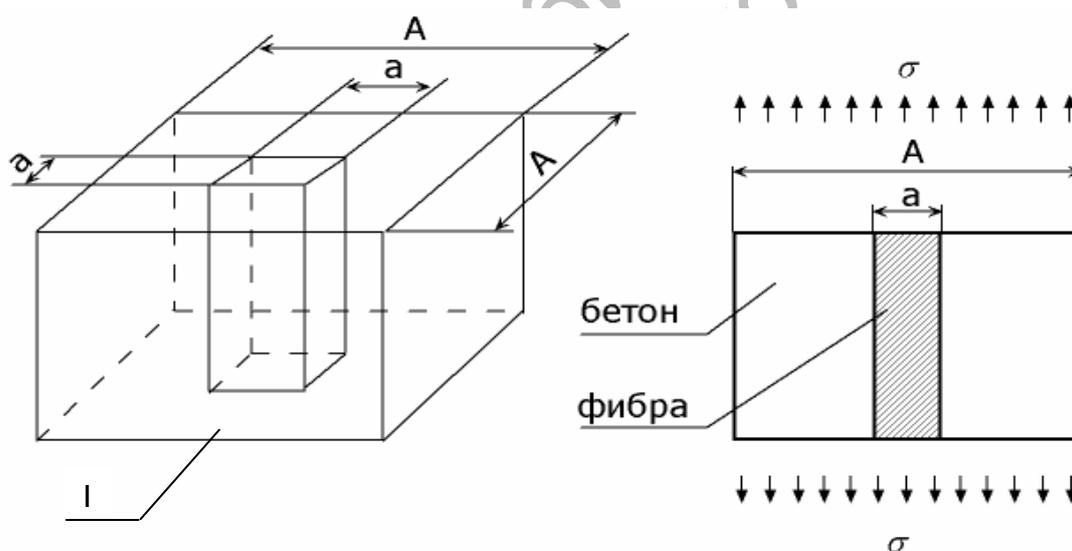


Рис. 2. Расположение фиброэлемента вдоль приложенной нагрузки в слое I

Допуская сохранение целостности выделенного слоя, можно утверждать, что упругие продольные деформации ε матрицы и фиброэлемента одинаковы и по закону Гука равны:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^I} = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f}, \quad (2)$$

где σ_c и σ_f – напряжения в бетоне и фиброэлементе соответственно; σ – усредненные напряжения по поперечному сечению выделенного элемента; E^I , E_c , E_f – модули продольной упругости слоя I, бетона и фиброэлемента соответственно.

Поверхностное содержание фибры

по поперечному сечению выделенного слоя равно

$$\mu_{\text{пов}} = \frac{a^2}{A^2} = \sqrt[3]{\mu_{\text{об}}} \quad (3)$$

На границе между бетонной матрицей и фиброй напряжение будет меняться скачкообразно. Определим усредненное напряжение в слое I по формуле

$$\sigma = \sigma_f \cdot \mu_{\text{пов}} + \sigma_c \cdot (1 - \mu_{\text{пов}}) \quad (4)$$

Выразим напряжения σ_c и σ_f через модули упругости и подставим результат в формулу (4):

$$\sigma_c = \frac{\sigma \cdot E_c}{E^I};$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma \cdot E_f}{E^I};$$

$$\sigma = \frac{\sigma \cdot E_f}{E^I} \cdot \mu_{\text{пов}} + \frac{\sigma \cdot E_c}{E^I} \cdot (1 - \mu_{\text{пов}}) \quad (5)$$

Откуда модуль упругости слоя I равен

$$\begin{aligned} E^I &= E_c + \mu_{\text{пов}} \cdot (E_f - E_c) = \\ &= E_c + \sqrt[3]{\mu_{\text{об}}} \cdot (E_f - E_c). \end{aligned} \quad (6)$$

Определим модуль упругости слоя II, в котором фибра расположена поперек приложенной нагрузки (рис. 3).

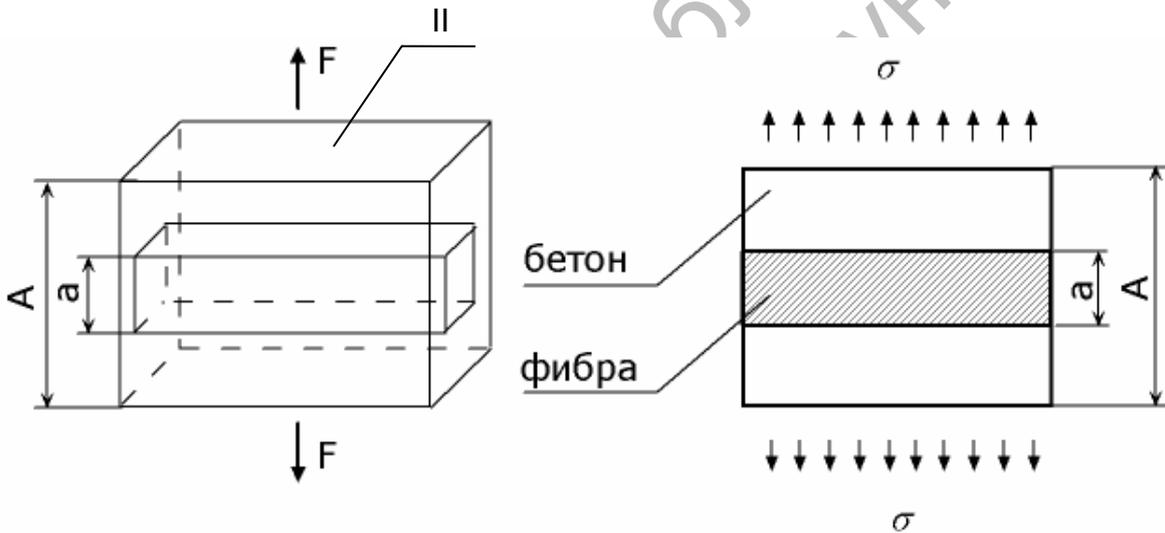


Рис. 3. Расположение фиброэлемента поперек приложенной нагрузки в слое II

Погонное содержание фибры по высоте выделенного объема равно

$$\mu_{\text{пог}} = \frac{a}{A} = \sqrt[3]{\mu_{\text{об}}} \quad (7)$$

Продольная деформация всего выделенного слоя будет складываться из деформаций входящих материалов:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_f \cdot \mu_{\text{пог}} + \varepsilon_c \cdot (1 - \mu_{\text{пог}}) = \\ &= \varepsilon_c + \mu_{\text{пог}} \cdot (\varepsilon_f - \varepsilon_c). \end{aligned} \quad (8)$$

Выразим деформации через результирующее напряжение по закону Гука:

$$\frac{\sigma}{E^{II}} = \frac{\sigma}{E_c} + \mu_{\text{пог}} \cdot \left(\frac{\sigma}{E_f} - \frac{\sigma}{E_c} \right) \quad (9)$$

После преобразований получаем модуль упругости слоя II:

$$E^{\text{II}} = \frac{E_c \cdot E_f}{E_f + \mu_{\text{пог}} \cdot (E_c - E_f)} = \frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}} \cdot (1 - E_c/E_f)}. \quad (10)$$

Введем в дальнейший расчет модули упругости E^{I} и E^{II} как упругие характеристики слоев, входящих в выделенный объемный элемент, в котором бетонная матрица окружает фиброэлемент со всех сторон.

Для варианта с продольным расположением фиброэлемента относительно приложенной нагрузки (рис. 4, а) определим модуль упругости фибробетона по формуле (10), подставляя вместо E_f мо-

дуль упругости слоя E^{I} (формула (6)):

$$E_{\text{fc}} = \frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}} \cdot (1 - E_c/E^{\text{I}})} = \frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}} \cdot (1 - E_c/(E_c + \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}}^2 \cdot (E_f - E_c)))}. \quad (11)$$

Для варианта с поперечным расположением фиброэлемента относительно приложенной нагрузки (рис. 4, б) определим модуль упругости фибробетона по формуле (6), подставляя вместо E_f модуль упругости слоя E^{II} (формула (10)):

$$E_{\text{fc}} = E_c + \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}}^2 \cdot (E^{\text{II}} - E_c) = E_c + \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}}^2 \times \left(\frac{E_c}{1 - \sqrt[3]{\mu_{\text{ог}}} \cdot (1 - E_c/E_f)} - E_c \right). \quad (12)$$

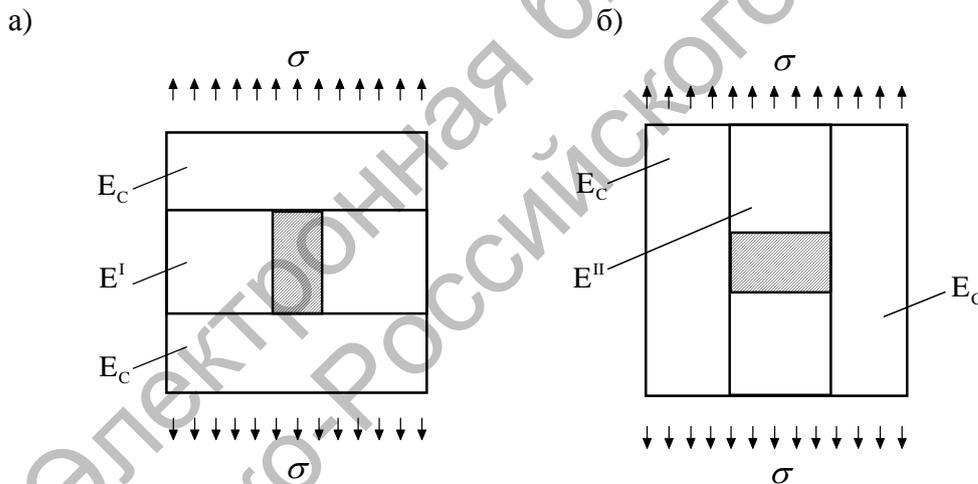


Рис. 4. Варианты продольного (а) и поперечного (б) расположений фиброэлемента в бетонной матрице

По формулам (11) и (12) были сделаны расчеты начального модуля упругости фибробетона при наиболее распространенном объемном содержании фибры: от 0,008 до 0,03 (от 0,8 до 3 %). Фибра в расчетах представлена материалами из разных групп модульности: сталь, стекло и полипропилен.

В качестве исходных модулей уп-

ругости материалов выбраны следующие усредненные значения: для бетонной матрицы – $E_c = 0,2 \cdot 10^5$ МПа; для стальной фибры – $E_f = 2 \cdot 10^5$ МПа; для стеклянной фибры – $E_f = 0,7 \cdot 10^5$ МПа; для полипропиленовой фибры – $E_f = 0,05 \cdot 10^5$ МПа.

Результаты расчета начального модуля упругости фибробетона в зави-

симости от объемного содержания фибры разной модульности при ее продольном и поперечном расположениях сведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета начального модуля упругости фибробетона

Объемное содержание фибры	Начальный модуль упругости фибробетона, МПа					
	Стальная фибра, E = 200 000 МПа		Стекловолоконная фибра, E = 70 000 МПа		Полипропиленовая фибра, E = 5 000 МПа	
	рис. 4, а	рис. 4, б	рис. 4, а	рис. 4, б	рис. 4, а	рис. 4, б
0,008	21 118	20 176	20 370	20 133	19 877	19 700
0,01	21 352	20 223	20 457	20 168	19 846	19 636
0,012	21 584	20 272	20 545	20 205	19 814	19 573
0,014	21 804	20 322	20 631	20 242	19 783	19 512
0,016	22 018	20 373	20 715	20 279	19 751	19 453
0,018	22 225	20 424	20 799	20 316	19 719	19 395
0,02	22 423	20 475	20 880	20 354	19 688	19 339
0,022	22 622	20 529	20 963	20 393	19 656	19 283
0,024	22 813	20 582	21 044	20 431	19 624	19 229
0,026	23 006	20 638	21 126	20 471	19 591	19 174
0,028	23 198	20 695	21 208	20 511	19 558	19 120
0,03	23 380	20 750	21 287	20 551	19 526	19 068

Схемы (см. рис. 4) представляют собой полярные случаи расположения фиброэлементов в бетонной матрице по отношению к действующей нагрузке. Влияние на упругие свойства фибробетона промежуточных (наклонных) положений фиброэлемента будет находиться между результатом по формуле (11) и результатом по формуле (12).

Окончательное значение начального модуля упругости фибробетона было получено усреднением величин, представленных в табл. 1. Возможна корректировка свойств фибробетона в зависимости от длины фиброволокна и количества фиброэлементов, попавших в плоскость разрушения [6].

Величина начального модуля упругости фибробетона в зависимости от вида и объемного содержания фибры показана на графике (рис. 5).

Выбор оптимального содержания фибры позволит моделировать заданные упругие свойства фибробетона с одновременным увеличением прочности, так как

большинство фиброматериалов обладают по сравнению с бетоном более высокими прочностными свойствами, особенно на растяжение. Предел прочности на растяжение для фибробетона может достигать 26 МПа, тогда как для обычного бетона он не превышает 5,5 МПа. По показателю работы разрушения фибробетон может в 15–20 раз превосходить бетон [2].

Область применения фибробетона в значительной степени зависит от его упругих свойств. Стальная высокомодульная фибра повышает прочность и пластичность бетона, сравнительно недорого, но существенной проблемой является комкование фибры при замесе. Более жесткие фиброэлементы воспринимают большую долю нагрузки, разгружая бетонную матрицу, поэтому такой материал хорошо себя проявляет при строительстве зданий повышенной взрыво- и взломоустойчивости, например здание Центрального Банка России в г. Москва. Для дорожного покрытия

применение сталефибробетона ограничено из-за возможной коррозии стали от действия атмосферных осадков, а более высокие упругие свойства в стесненных условиях будут создавать дополнительные температурные напряжения при перепаде

температур. Сопротивление ударным нагрузкам нельзя прогнозировать однозначно, так как рост прочностных свойств материала может быть нивелирован уменьшением его деформативной способности.

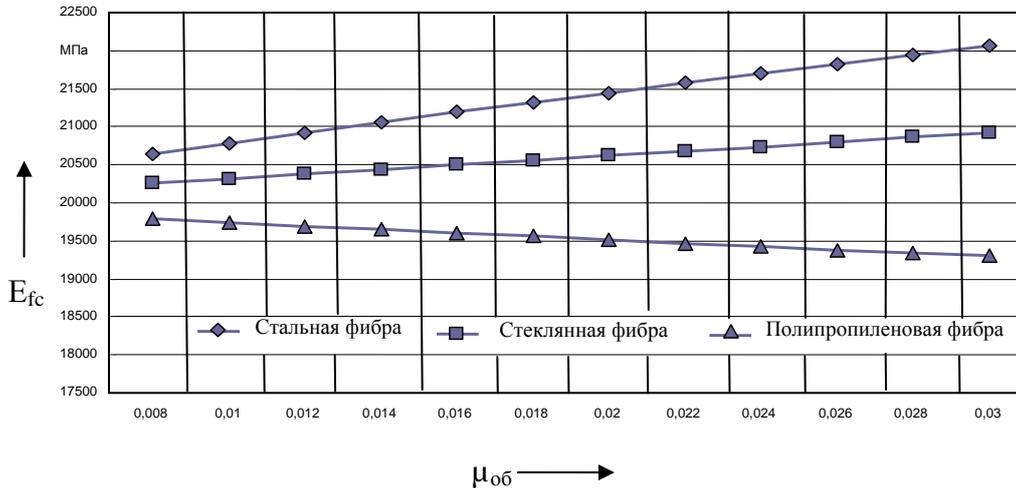


Рис. 5. График зависимости начального модуля продольной упругости фибробетона от вида и объемного содержания фибры

Среднемодульная стеклофибра кроме того, что имеет хорошую жаростойкость, не комкуется при смешивании. Она должна уменьшить трещинообразование, скрепляя цементный камень огромным количеством тонких нитей. По исследуемым показателям она больше подходит для объектов дорожного строительства, чем стальная фибра, так как меньше реагирует на перепады температур, не корродирует во влажной среде, более устойчива к ударным нагрузкам благодаря увеличению прочности при незначительном увеличении жесткости. Стеклянная фибра более близка по упругим свойствам к бетонной матрице, что должно дать наибольший эффект при атмосферном воздействии: уменьшить развитие внутрискруктурных усадочных напряжений от циклического замачивания-высушивания и нагревания-охлаждения.

Использование низко модульной по-

липропиленовой фибры препятствует образованию усадочных трещин на этапе изготовления, повышает морозостойкость при эксплуатации. Понижение модуля упругости фибробетона способствует его лучшей деформативности, что гасит энергию удара и уменьшает напряжения при перепаде температур для конструкций, работающих в стесненных условиях. Полипропилен обладает еще одним ценным качеством: обладая прочностью, как сталь и выше, почти в 9 раз легче стали, что важно при больших объемах бетонных работ.

Высокая технико-экономическая эффективность использования фибробетона может быть достигнута при учете максимального снижения материалоемкости и собственного веса конструкции за счет использования тонкостенных элементов повышенной прочности. Простая замена бетона на фибробетон

не позволит полностью реализовать его ценные свойства и получить ощутимый экономический эффект. Для ведения проектировочных расчетов необходимо знать характеристики упругости и прочности материала, в частности модуль продольной упругости, известные данные по которому для фибробетона недостаточны или противоречивы. Частично этот пробел восполняет данная работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волков, И. В.** Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве / И. В. Волков // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 12–13.
2. **Волков, И. В.** Фибробетон : состояние и перспективы применения / И. В. Волков // Промышленное и гражданское строительство. – 2002. – № 8. – С. 37–38.
3. **ВСН 56–97.** Проектирование и основные

положения технологий производства фибробетонных конструкций. – М. : Науч.-техн. упр-ние Департамента стр-ва, 1997. – 37 с.

4. **Бочарников, А. С.** Тонкостенные конструкции несъемной опалубки из бетонов с дисперсной арматурой из стальных волокон / А. С. Бочарников, А. Д. Корнеев // Строительные материалы, оборудование, технологии. – 2005. – № 5. – С. 22–23.

5. Сталефибробетонные конструкции в автомобильном строительстве Республики Башкортостан / В. В. Бабков [и др.] // Строительные материалы. – 2006. – № 3. – С. 50–53.

6. **Бочарников, А. С.** Вероятное количество фибр, участвующих в работе разрушения сталефибробетонного образца / А. С. Бочарников, А. Д. Корнеев // Технологии бетонов. – 2005. – № 5. – С. 17–18.

7. **Ицкович, С. М.** Технология заполнителей бетона : учебник для строит. вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов. – М. : Высш. шк., 1991. – 272 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 27.04.2007

I. A. Leonovich, A. A. Leonovich
**Influence resilience characteristic
of composite materials on properties
fibre concretes**
Belarusian-Russian University

Initial elastic module of fibre concrete according to resilience properties and volume content of fibre methods have been suggested. Optimization of fibra concrete content is possible arrive at necessary elastic properties, which influence on resistance to dynamic and static loading. Charts predicted elastic module of fibra concrete within the normal content steel, glass and polipropilen fibre have been obtained.