

УДК 69.04, 691.328.4, 693.554.486

*ПЛЕВКОВ ВАСИЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
pvs@tomsksep.ru
КОЛУПАЕВА СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА, докт. физ.-мат. наук, профессор,
ksn@tsuab.ru
КУДЯКОВ КОНСТАНТИН ЛЬВОВИЧ, аспирант,
konst_k@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

РАСЧЕТНЫЕ ДИАГРАММЫ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОНА ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований базальтофибробетона при сжатии и растяжении. Установлено положительное влияние дисперсного армирования бетона базальтовыми волокнами на его прочностные и деформативные свойства. На основе статистической обработки данных предложены аналитические выражения для определения основных прочностных и деформационных характеристик базальтофибробетона при сжатии и растяжении. Разработаны расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействии.

Ключевые слова: базальтовая фибра; фибробетон; прочность; деформативность; диаграмма нелинейного деформирования; статическое нагружение; кратковременное динамическое нагружение; коэффициент динамического упрочнения.

*VASILII S. PLEVKOV, DSc, Professor,
pvs@tomsksep.ru
SVETLANA N. KOLUPAEVA, DSc, Professor,
ksn@tsuab.ru
KONSTANTIN L. KUDYAKOV, Research Assistant,
konst_k@gmail.ru
Tomsk State University Of Architecture And Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

CALCULATING DIAGRAMS OF NONLINEAR DEFORMATION OF BASALT FIBER CONCRETE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

The article presents the results of experimental studies of basalt fiber concrete under the compressive and tensile loads. It is shown that basalt fiber reinforcement with basalt has a positive effect on the concrete strength and deformation properties. Based on the statistical analysis of the experimental data, analytic expressions are proposed to identify the main strength and deformation properties of fiber-reinforced concrete under the compressive and tensile loads. The calculating diagrams are obtained for the nonlinear deformation of basalt fiber-reinforced concrete under static and dynamic loads.

Keywords: basalt fiber; fiber-reinforced concrete; strength; deformability; nonlinear deformation; static loads; dynamic loads; dynamic strengthening factor.

На строительном рынке появляются новые архитектурно-строительные системы, предназначенные для сложных условий эксплуатации. При возведении таких систем применяются ресурсосберегающие технологии с использованием малоэнергоемких конструкционных материалов с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Перспективным материалом, отвечающим вышеназванным требованиям, является бетон с дисперсно-армированными волокнами минерального и органического происхождения. В таком бетоне формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая эффективно противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при внешних силовых воздействиях.

Среди множества материалов, используемых для дисперсного армирования бетонов, можно выделить базальтовые волокна. Перспективность их применения объясняется доступностью и широкой распространенностью сырьевой базы для изготовления базальтовых волокон, экологичностью их производства, а также их высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Применение данного материала для дисперсного армирования затруднено в связи с технологическими сложностями обеспечения равномерности распределения базальтовых волокон в цементной матрице бетона, малоизученностью свойств базальтофибробетона, а также наличием проблем в инженерных методах расчета конструкций из базальтофибробетона [1–5].

Для обоснования эффективности применения фибробетонов на основе базальтовых волокон, а также разработки моделей нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических нагружениях, применимых при расчетах строительных конструкций по деформационной модели, проведены экспериментальные исследования в соответствии с программой (рис. 1), состоящей из трех этапов:

1. Разработка составов и технологий изготовления базальтофибробетона.
2. Исследование прочности базальтофибробетона при сжатии и раскалывании.
3. Исследование деформационных свойств базальтофибробетона при сжатии и растяжении.

Первый этап включал в себя разработку составов и технологий изготовления базальтофибробетона, обеспечивающих равномерное распределение волокон в теле бетона. Варьировались следующие параметры: процент дисперсного армирования бетона базальтовыми волокнами (μ_{bf}), способы их предварительной подготовки различными химическими добавками, селективность введения компонентов, режим перемешивания фибробетонной смеси. Содержание волокон в бетонной смеси назначалось по отношению к массе цемента в процентах.

Разработка составов фибробетонной смеси с маркой по подвижности П2 проводилась по методике, разработанной на кафедре строительных материалов и технологии ТГАСУ (г. Томск, Россия). Базовый состав бетона соответ-

ствовал 1:1,5:4 (Ц: П: Щ) при водоцементном отношении, равном 0,65. В бетонную смесь вводились базальтовые волокна в количестве $\mu_{bf} = 0-1\%$ с шагом 0,2% и $\mu_{bf} = 1-5\%$ с шагом 1%.

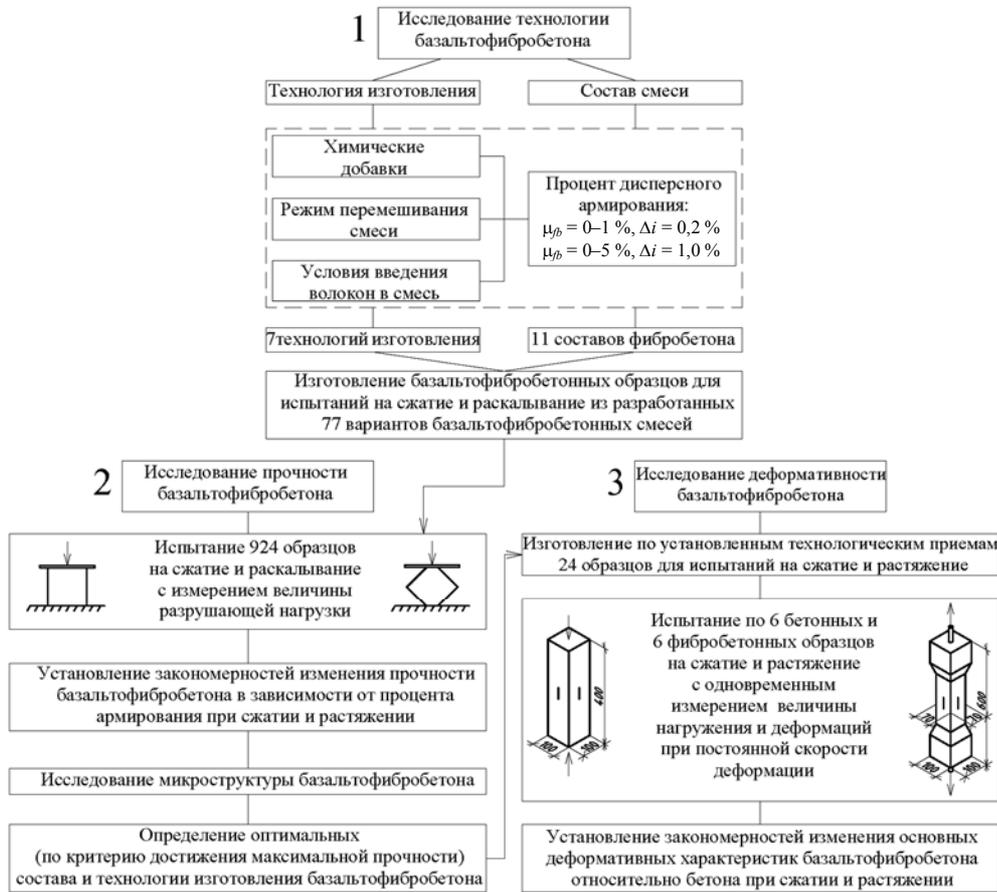


Рис. 1. Программа экспериментальных исследований технологии, прочности и деформативности базальтофибробетона при статическом нагружении

Всего было разработано 11 составов базальтофибробетонных смесей, отличающихся процентом дисперсного армирования, и 7 различных технологий изготовления фибробетонной смеси. Согласно разработанным технологиям и составам приготовлены 77 вариантов базальтофибробетонных смесей, для каждого из которых были изготовлены экспериментальные образцы для испытаний на сжатие и раскалывание, по 6 образцов на каждый тип испытания. Всего было изготовлено и испытано 924 образца [1].

На втором этапе исследовались прочностные свойства базальтофибробетона при сжатии и раскалывании.

Фибробетонные образцы испытывались в возрасте 28 сут статической нагрузкой на электромеханическом прессе Instron-3382 на сжатие по ГОСТ 10180–2012 и на раскалывание по рекомендациям [6]. В результате

испытаний были получены значения разрушающей нагрузки базальтофибробетонных образцов.

Для всех серий испытанных образцов была проведена статистическая обработка результатов эксперимента, которая включала в себя: построение вариационных рядов, вычисление статистических характеристик, исключение аномальных значений, проверку полученных данных на соответствие предполагаемому теоретическому закону распределения, проверку выборок на однородность, оценку значимости моделей с применением критериев Стьюдента и Фишера.

В качестве исследуемой величины для статистического анализа была принята величина относительного прироста прочности фибробетона ($k_{bf/b}^{\sigma} = R_{bf/b} / R_b$ и $k_{bf/bt}^{\sigma} = R_{bf/bt} / R_{bt}$). Были рассмотрены линейная, логарифмическая, степенная и полиномиальная регрессионные зависимости. При выполнении статистического анализа использовались компьютерные программы Origin и StatPlus 2007, позволяющие решать широкий круг исследовательских задач, связанных с обработкой экспериментальных данных с возможностью применения разнообразных алгоритмов.

Анализ полученных данных позволил выявить оптимальную технологию изготовления базальтофибробетона (Т1) по критерию достижения максимального прироста прочности фибробетона при высокой стабильности прочностных показателей (коэффициент вариации показателей прочности не превышал 4,1 %). Технология Т1 заключалась в следующем: волокна вводились в бетонную смесь, предварительно перемешанную с 40 % воды затворения, с последующим перемешиванием смеси в смесителе принудительного действия со скоростью 400 об/мин.

Для образцов, изготовленных по технологии Т1, получены зависимости прироста прочности базальтофибробетона от процента дисперсного армирования при $\mu_{bf} = 0-1$ % (рис. 2). На рис. 2 точками обозначены результаты экспериментальных исследований, сплошной линией показана линия регрессии в виде полинома 3-й степени из табл. 1, пунктирными – границы области доверительной вероятности 95 % для линии регрессии. Зависимости изменения коэффициентов упрочнения базальтофибробетона от процента дисперсного армирования выражены полиномами 3, 4 и 5-й степени с соответствующими коэффициентами детерминации и представлены в табл. 1 (значения μ_{bf} выражены в процентах).

Максимальные значения коэффициентов упрочнения базальтофибробетона получены при содержании базальтовых волокон $\mu_{bf} = 0,5$ %.

Для установления причин снижения прочности базальтофибробетона при увеличении процента армирования, а также для изучения особенностей разрушения базальтофибробетона был проведен анализ микроструктуры поверхности разрушенных базальтофибробетонных образцов.

Микроструктурный анализ серий образцов показал, что при $\mu_{bf} = 0-0,6$ % наблюдается равномерное распределение волокон в базальтофибробетоне (рис. 3, а). При увеличении содержания волокон $\mu_{bf} = 0,6-5$ % в теле фибробетона образуются локальные скопления перемешанных базальтовых волокон,

неравномерно распределенных по объему (рис. 3, б), что нарушает однородность структуры фибробетона и способствует образованию зон концентрации напряжений, появлению трещин и, как следствие, приводит к снижению прочностных показателей фибробетона.

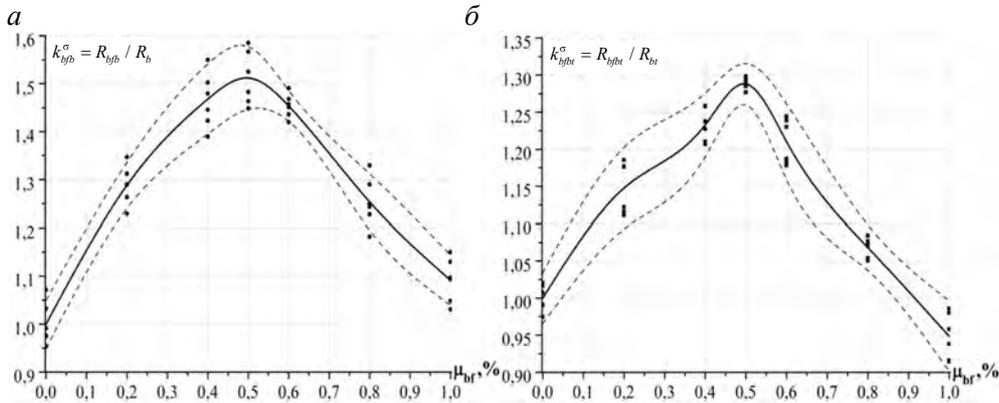


Рис. 2. Графики изменения коэффициентов упрочнения базальтофибробетона от процента дисперсного армирования:
а – при сжатии; б – при растяжении

Таблица 1

Полиномиальные функции изменения коэффициентов упрочнения базальтофибробетона при сжатии и растяжении

Степень полинома	Аппроксимирующая функция	Коэффициент детерминации R^2
При сжатии		
3	$k_{fib}^{\sigma} = 1 + 2,202\mu_{bf} - 2,917\mu_{bf}^2 + 0,79\mu_{bf}^3$	0,9744
4	$k_{fib}^{\sigma} = 1 + 1,205\mu_{bf} + 2,552\mu_{bf}^2 - 8,213\mu_{bf}^3 + 4,547\mu_{bf}^4$	0,9983
5	$k_{fib}^{\sigma} = 1 + 1,481\mu_{bf} + 0,157\mu_{bf}^2 - 1,387\mu_{bf}^3 - 3,3\mu_{bf}^4 + 3,141\mu_{bf}^5$	0,9986
При растяжении		
3	$k_{fibt}^{\sigma} = 1 + 1,206\mu_{bf} - 1,656\mu_{bf}^2 + 0,387\mu_{bf}^3$	0,9585
4	$k_{fibt}^{\sigma} = 1 + 0,426\mu_{bf} + 2,623\mu_{bf}^2 - 6,658\mu_{bf}^3 + 3,558\mu_{bf}^4$	0,9841
5	$k_{fibt}^{\sigma} = 1 + 0,699\mu_{bf} + 0,249\mu_{bf}^2 + 0,108\mu_{bf}^3 - 4,22\mu_{bf}^4 + 3,114\mu_{bf}^5$	0,9847

На рис. 3, 4 сплошной линией выделены разорванные и закрепленные в бетоне волокна, пунктирной линией выделены кратеры, образовавшиеся от выдернутых волокон.

Анализ контактной зоны базальтового волокна и цементного камня бетона (рис. 4, а) позволил выявить новообразования на поверхности волокон, появившиеся вследствие химического взаимодействия базальтового волокна и продуктов гидратации цемента, что свидетельствует о повышенной адгезии волокон с цементным камнем.

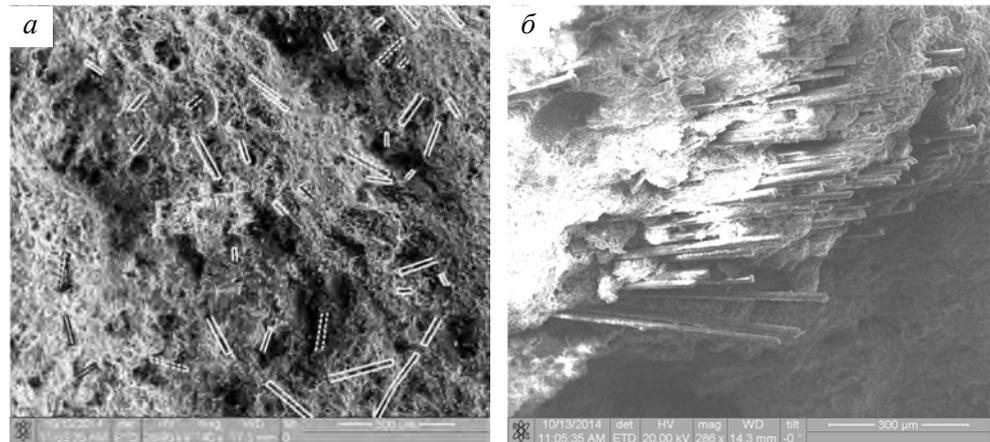


Рис. 3. Распределение волокон в объеме фибробетона, изготовленного по технологии Т1 при соответствующем проценте армирования:

a – равномерное распределение, $\mu_{bf} = 0,5 \%$; *б* – неравномерное распределение с образованием неперемешанных сгустков волокон, $\mu_{bf} = 5,0 \%$

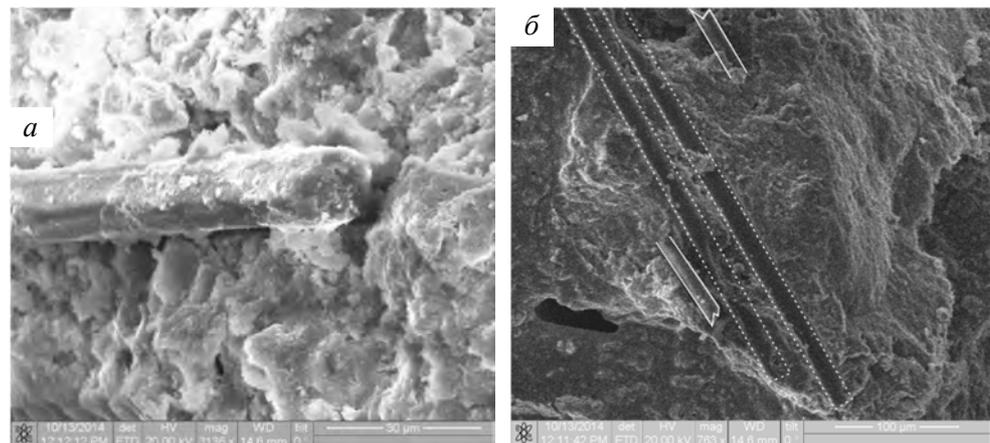


Рис. 4. Микрофотографии поверхности разрушенного базальтофибробетонного образца: *a* – новообразования на поверхности волокон; *б* – разорванные волокна и кратеры, образованные в результате выдергивания волокон

Согласно работе [2], разрушение фибробетонов с объемно-произвольной ориентацией волокон может происходить по 2 схемам:

- 1) исчерпание прочности фибробетона происходит из-за обрыва некоторого количества фибр и выдергивания из тела бетона остальных фибр;
- 2) прочность исчерпывается из-за выдергивания условно всех фибр.

В случае с базальтофибробетоном, ввиду физико-механических особенностей базальтовых волокон, разрушение происходит по первой схеме: при осмотре поверхности фибробетонных образцов установлено, что часть волокон имеют следы разрыва, часть волокон выдернуты из тела бетона (рис. 4, *б*).

На третьем этапе проводились экспериментальные исследования деформационных свойств базальтофибробетона.

Для испытаний на сжатие и растяжение были изготовлены образцы в виде призм и «восьмерок» из базового состава бетона и базальтофибробетона, приготовленного согласно Т1 при $\mu_{bf} = 0,5\%$. В конструкции «восьмерок» на обоих концах были устроены металлические анкера для крепления в захватах испытательной установки. Всего было изготовлено по 6 бетонных и фибробетонных образцов для каждого типа испытания.

Экспериментальные образцы испытывались в возрасте 28 сут статической нагрузкой согласно ГОСТ 10180–2012 с применением электрогидравлического пресса UTM-4500 и электромеханической разрывной машины Instron-3382. Нагружение проводилось с обеспечением постоянной скорости деформации образцов. Деформации бетона и фибробетона измерялись при помощи установленных на поверхности образцов тензорезисторов и цифровой оптической системы Vic3D. Данная система использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений, который позволяет на основе их анализа получить качественную и количественную оценку полей деформаций и перемещений для исследуемой поверхности испытываемого нагружением образца. Система позволяет проводить детальную обработку и анализ полученных данных, в том числе устанавливать виртуальные цифровые экстензометры в произвольных местах полученных изополей, с помощью которых можно получить относительные деформации в характерных зонах поверхности образца.

Показания экстензометра системы Vic3D и характерные изополя развития продольных деформаций по поверхности бетонных и фибробетонных образцов при напряжениях, характеризующих начало и окончание ниспадающего участка диаграммы « $\sigma - \epsilon$ », приведены на рис. 5.

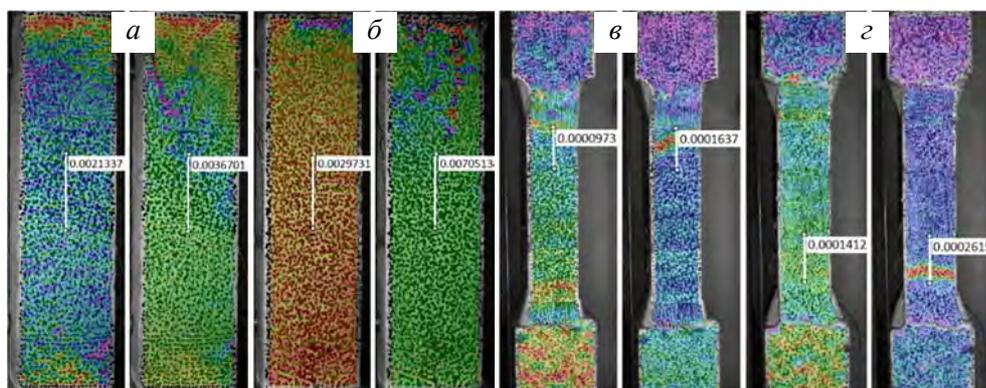


Рис. 5. Показания экстензометра системы Vic3D и характерные изополя развития продольных деформаций соответственно при напряжениях, характеризующих начало и окончание ниспадающего участка диаграммы « $\sigma - \epsilon$ », в образцах:

a – сжатых бетонных; *b* – сжатых базальтофибробетонных; *v* – растянутых бетонных; *z* – растянутых базальтофибробетонных

Полученные результаты экспериментальных исследований, обработанные методами математической статистики, приведены в табл. 2. Значения коэффициента поперечной деформации базальтофибробетона ν_{bfb} изменялись в диапазоне 0,2–0,214.

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований
деформативности базальтофибробетона при сжатии и растяжении**

При сжатии							
R_{bfb} , МПа	V , %	$\varepsilon_{bfb, u}$	V , %	$\varepsilon_{bfb, m}$	V , %	$E_{bfb, 0}$, ГПа	V , %
39,1 (1,50)	3,86	0,0031 (1,41)	4,39	0,0068 (1,79)	6,21	34,7 (1,25)	1,81
При растяжении							
R_{bfbt} , МПа	V , %	$\varepsilon_{bfbt, u}$	V , %	$\varepsilon_{bfbt, m}$	V , %	$E_{bfbt, 0}$, ГПа	V , %
2,7 (1,29)	3,85	0,00014 (1,4)	4,85	0,00025 (1,56)	7,39	33,6 (1,23)	1,11

Примечания: 1. V – коэффициент вариации экспериментальных данных. 2. В таблице указаны усредненные значения по выборке. 3. В скобках представлены величины, характеризующие отношение соответствующих значений базальтофибробетона к значениям обычного бетона.

Опыты показывают, что диаграммы « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » зависят от многих факторов (вида бетона, его состава, соотношения свойств компонентов, степени сцепления между цементным камнем и крупным заполнителем, их деформативных характеристик, скорости нагружения и пр.), общий характер их сохраняется и вследствие развития дефектов структуры являются нелинейными, содержащими в общем случае нелинейный восходящий и нисходящие участки.

Для аналитического описания диаграммы « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона различными авторами предлагаются более 80 аппроксимаций уравнениями полиномов второй, третьей и пятой степени; уравнением эллипса; диаграммой Прандтля; в виде экспоненты; тригонометрических рядов; дробно-рациональных функций; используется также аппарат сплайн-функций. Большинство таких функций являются упрощенными и учитывают не все нормируемые величины, влияющие на характер работы материала, что существенно ограничивает возможности их использования [7–12].

Достаточно хорошо можно описать зависимость между напряжением и деформацией сжатого бетона многочленом вида

$$\sigma_{b,i} = R_b \left[A \frac{\varepsilon_{b,i}}{\varepsilon_{b,u}} + B \left(\frac{\varepsilon_{b,i}}{\varepsilon_{b,u}} \right)^2 + \dots + F \left(\frac{\varepsilon_{b,i}}{\varepsilon_{b,u}} \right)^n \right],$$

где n – степень многочлена, принимается в зависимости от задач и необходимой точности решения и равна $n = 2; 3; 4; 5$; A, B, \dots, F – расчетные коэффициенты, которые подбираются на основании лучшего приближения кривой

« $\sigma_b - \varepsilon_b$ » к экспериментальным данным; $\varepsilon'_{b,m}$ – деформации бетона, соответствующие достижению в нем призменной прочности $\varepsilon_{b,u}$.

Для описания зависимости между напряжением и деформацией базальтофибробетона с учетом рекомендаций [10] предложена функция в виде полинома пятой степени, которая, в случае описания базальтофибробетона при сжатии, имеет вид

$$\sigma_{bfb,i} = A \frac{\varepsilon_{bfb,i}}{\varepsilon_{bfb,u}} + B \left(\frac{\varepsilon_{bfb,i}}{\varepsilon_{bfb,u}} \right)^2 + C \left(\frac{\varepsilon_{bfb,i}}{\varepsilon_{bfb,u}} \right)^3 + D \left(\frac{\varepsilon_{bfb,i}}{\varepsilon_{bfb,u}} \right)^4 + F \left(\frac{\varepsilon_{bfb,i}}{\varepsilon_{bfb,u}} \right)^5, \quad (1)$$

где
$$F = \frac{3[(1+b)L_1 + 2bL_2]}{1 - 3b + 6b^2 - 4b^3}; \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{1+b} \left[-L_2 - \frac{7}{3}(b^2 + b + 1)F \right]; \quad (3)$$

$$C = -L_1 - 2D - 3F; \quad (4)$$

$$B = -\frac{1}{2}(A + 3C + 4D + 5F); \quad (5)$$

$$A = \varepsilon_{bfb,u} E_{bfb,0}. \quad (6)$$

В формулах (1) – (6) введены обозначения:

$$L_1 = 2R_{bfb} - \varepsilon_{bfb,u} E_{bfb,0}; \quad (7)$$

$$L_2 = \left[R_{bfb} \left(1 - \frac{a}{b^2} \right) + \varepsilon_{bfb,u} E_{bfb,0} \left(\frac{b-1}{b} \right) \right] \frac{1}{b-1}; \quad (8)$$

$$a = 0,85; \quad b = \frac{\varepsilon_{bfb,m}}{\varepsilon_{bfb,u}}. \quad (9)$$

В случае растянутого базальтофибробетона в формулах (1) – (9) следует применять соответствующие значения $\sigma_{bfb,i}$, $\varepsilon_{bfb,i}$, R_{bfb} , $\varepsilon_{bfb,u}$, $\varepsilon_{bfb,m}$. Значения начального модуля упругости при растяжении и сжатии базальтофибробетона приняты равными между собой.

При подстановке значений из табл. 2 в выражение (1), а также наложении характерных экспериментальных данных построены графики деформирования бетона и базальтофибробетона при сжатии и растяжении (рис. 6). На рис. 6 маркерами представлены экспериментальные значения при испытании бетона (■) и базальтофибробетона (●), сплошными линиями обозначены графики полиномиальных функций (1), пунктирными – границы области доверительной вероятности 95 % для линии регрессии.

Полученные результаты позволили предложить диаграмму нелинейного деформирования базальтофибробетона в зависимости от процента дисперсного армирования при статическом нагружении (рис. 7).

В данной диаграмме нелинейного деформирования базальтофибробетона использованы следующие обозначения:

$$E_{bfb,0} = E_{bft,0} = k_{bfb,0}^E E_{bfb,0}, \quad R_{bfb} = k_{bfb}^\sigma R_b, \quad \varepsilon_{bfb,u} = k_{bfb,u}^\varepsilon \varepsilon_{b,u}, \quad \varepsilon_{bfb,m} = k_{bfb,m}^\varepsilon \varepsilon_{b,m},$$

$$R_{bft} = k_{bft}^\sigma R_{bt}, \quad \varepsilon_{bft,u} = k_{bft,u}^\varepsilon \varepsilon_{bt,u}, \quad \varepsilon_{bft,m} = k_{bft,m}^\varepsilon \varepsilon_{bt,m}, \quad (10)$$

где k_{bfb}^σ и k_{bft}^σ определяются из табл. 1, а эмпирические коэффициенты $k_{bfb,u}^\varepsilon$, $k_{bfb,m}^\varepsilon$, $k_{bft,u}^\varepsilon$, $k_{bft,m}^\varepsilon$, $k_{bfb,0}^E$ – из табл. 3. Положение параметрических точек A_1 , B_1 , C_1 , E_1 определяется пропорционально соответствующим координатам точки D_1 в зависимости от μ_{bf} .

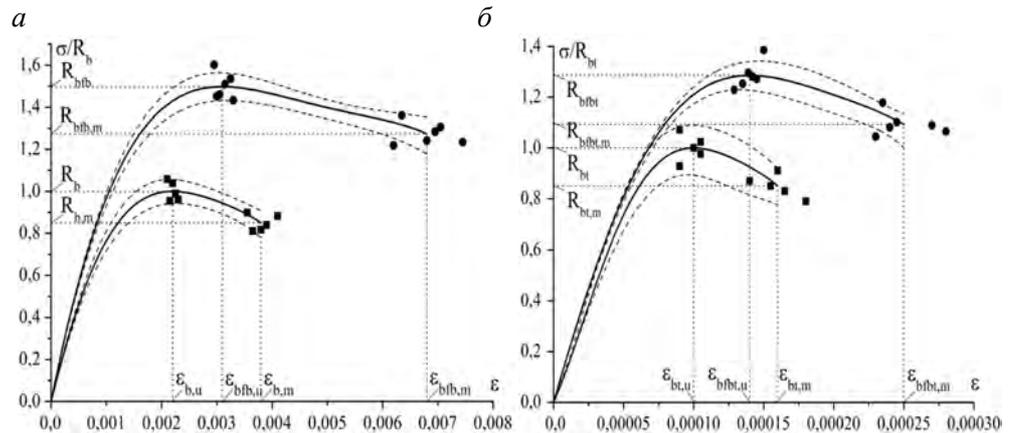


Рис. 6. Графики деформирования бетона и базальтофибробетона, описанные полиномом пятой степени, с характерными результатами экспериментов:
а – при сжатии; б – при растяжении

Кратковременные динамические воздействия приводят к изменению прочностных и деформативных характеристик бетона по сравнению со статическим его нагружением. При динамическом нагружении наблюдается неравномерное развитие и определенное запаздывание деформации по сравнению с результатами статических испытаний. Неравномерности развития продольных и запаздывание по сравнению с ними интенсивности развития поперечных деформаций создают эффект динамической обоймы, вызывая в бетоне сложное напряженное состояние, что соответствует механизму упрочнения бетона первого рода при динамическом нагружении. Упрочнение второго рода связано с запаздыванием продольных и поперечных деформаций, вызванных тем, что не вся внешняя потенциальная энергия мгновенно переходит в потенциальную энергию деформирования бетона. Оставшаяся часть энергии сохраняется в виде кинетической энергии движения частиц бетона и передается от одних частиц к другим, приводя к накоплению их скорости и разлету образующихся обломков при разрушении.

Влияние скорости деформирования на свойства бетона проявляется в изменении положения параметрических точек на диаграмме деформаций и в повышении предела прочности. При увеличении скорости нагружения диаграмма « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » изменяется, приближаясь на начальном участке к прямой линии, что объясняется запаздыванием неупругих деформаций, которые про-

являются лишь при усилиях, близких к предельным статическим. Начальный модуль деформации бетона несколько возрастает [11–14].

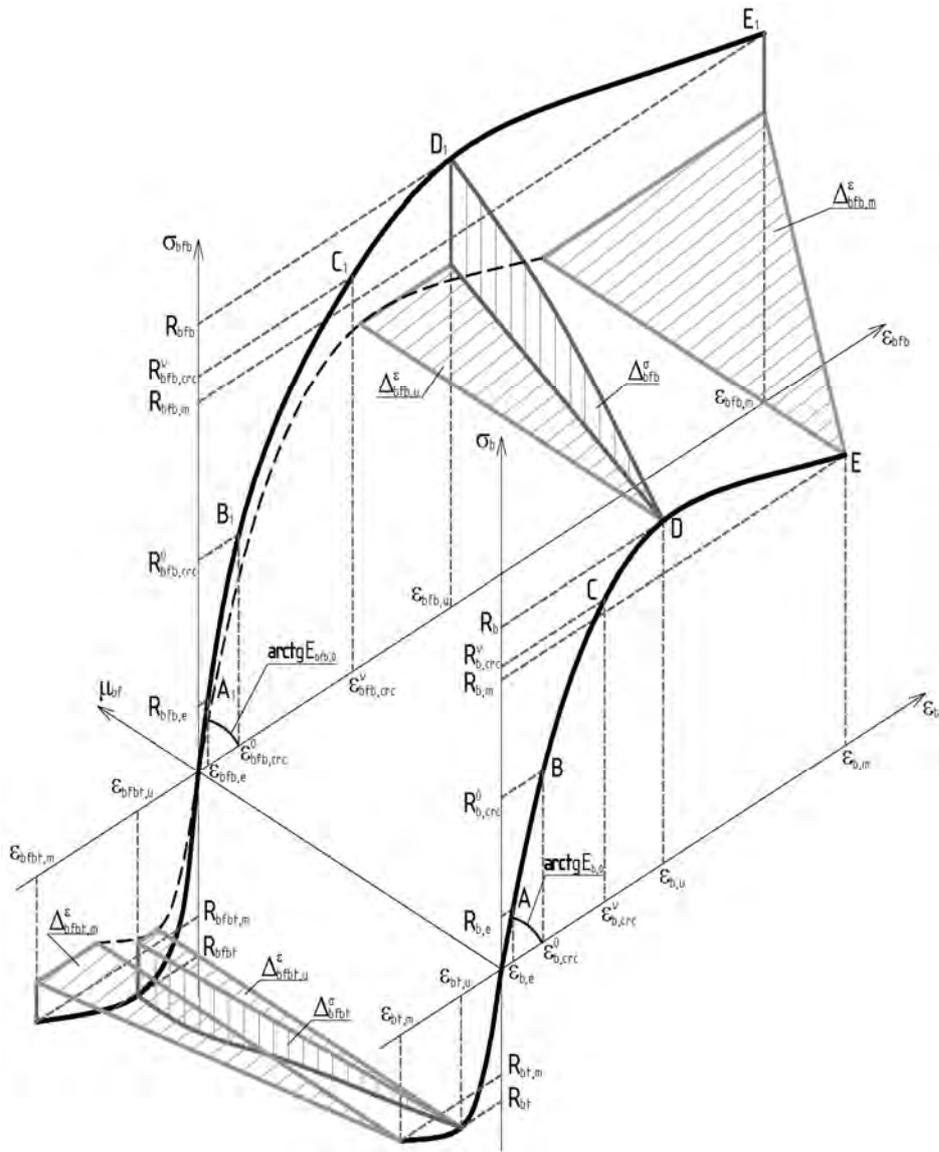


Рис. 7. Диаграмма нелинейного деформирования базальтофибробетона в зависимости от процента дисперсного армирования при статическом сжатии и растяжении

Влияние различных факторов на динамическую прочность бетона в настоящей работе учитывается интегрально, путем использования коэффициентов динамического упрочнения бетона при сжатии $k_{b,d}$ и растяжении $k_{bt,d}$, которые равны отношению динамической прочности бетона к статической при сжатии и растяжении соответственно.

Таблица 3

Значения коэффициентов для определения основных деформационных характеристик базальтофибробетона

$\mu_{bf}, \%$	$k_{bfb,\mu}^E$	$k_{bfb,m}^E$	$k_{bfbt,\mu}^E$	$k_{bfbt,m}^E$	$k_{bfb,0}^E$
$\mu_{bf} \leq 0,5$	$1 + 0,82\mu_{bf}$	$1 + 1,58\mu_{bf}$	$1 + 0,80\mu_{bf}$	$1 + 1,12\mu_{bf}$	$1 + 0,46\mu_{bf}$
$0,5 < \mu_{bf} \leq 1,0$	1,41	1,79	1,40	1,56	1,23

Коэффициенты динамического упрочнения бетона определяют на основе статистической обработки экспериментальных данных. Различными авторами к настоящему времени предложены линейные, логарифмические, степенные и другие функции, аппроксимирующие изменения $k_{b,d}$ и $k_{bt,d}$ от времени загрузки или скорости деформирования, а также от скорости изменения напряжений. Результаты динамических испытаний бетонных образцов отечественными и зарубежными учеными [14–16] представлены на рис. 8.

Динамическое упрочнение фибробетона зависит от физико-механических свойств бетона-матрицы, фибры и условий их взаимодействия. При этом вопросы влияния кратковременных динамических нагрузжений на свойства фибробетонов, армированных базальтовыми волокнами, в настоящее время малоизучены. Для расчетов прочности базальтофибробетона, подверженного кратковременному динамическому воздействию, предлагается принимать в качестве минимального упрочняющего динамического фактора фибробетона – динамическое упрочнение бетона-матрицы. По итогам статистического анализа данных, представленных на рис. 8, для определения значений коэффициентов упрочнения бетона и базальтофибробетона предложены следующие выражения:

$$k_{b,d} = k_{bfb,d} = 1,12 - 0,03(\lg \tau) + 0,03(\lg \tau)^2; \quad (11)$$

$$k_{bt,d} = k_{bfbt,d} = 1,08 - 0,07(\lg \tau) + 0,025(\lg \tau)^2, \quad (12)$$

где τ – время действия нагрузки, с.

Динамический предел прочности базальтофибробетона сжатию либо растяжению предлагается определять умножением статического предела прочности базальтофибробетона на соответствующий коэффициент динамического упрочнения, определяемый из выражений (11) и (12):

$$R_{bfb,d} = k_{bfb,d} R_{bfb}; \quad (13)$$

$$R_{bfbt,d} = k_{bfbt,d} R_{bfbt}. \quad (14)$$

Использование динамических коэффициентов упрочнения для базальтофибробетона $k_{bfb,d}$ и $k_{bfbt,d}$ для практических расчетов фиброжелезобетонных конструкций позволяет получить динамическую диаграмму деформирования базальтофибробетона на основе статической (рис. 9).

Положение параметрических точек A'_1 , B'_1 , C'_1 , E'_1 определяется пропорционально соответствующим координатам точки D'_1 в зависимости от времени действия нагрузки.

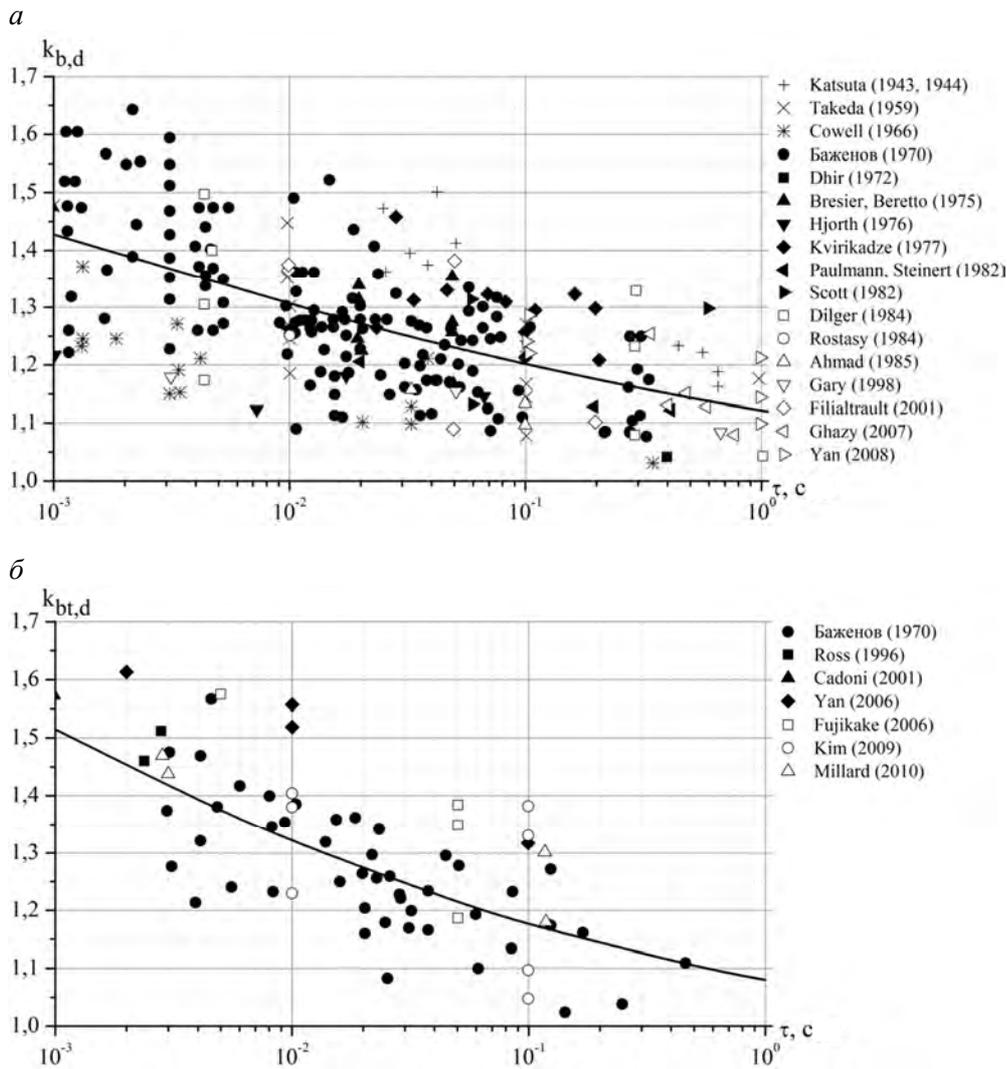


Рис. 8. Изменение относительной прочности бетона в диапазоне времени действия нагрузки 1–1000 мс:
 а – при сжатии; б – при растяжении

Проведенные экспериментальные исследования показали, что применение базальтовых волокон при дисперсном армировании бетонов ($\mu_{bf} = 0,5\%$) позволяет не только увеличить прочностные показатели при сжатии и растяжении в 1,5 и 1,3 раза соответственно, но и значительно улучшить деформативные характеристики материала: увеличить значения предельных деформаций при сжатии на 79 % и при растяжении на 56 %, начальный модуль упругости на 23 %.

На основе статистической обработки данных предложены аналитические выражения для определения основных прочностных и деформационных характеристик сжатого и растянутого базальтофибробетона при статическом

и кратковременном динамическом воздействии в зависимости от процента дисперсного армирования μ_{bf} .

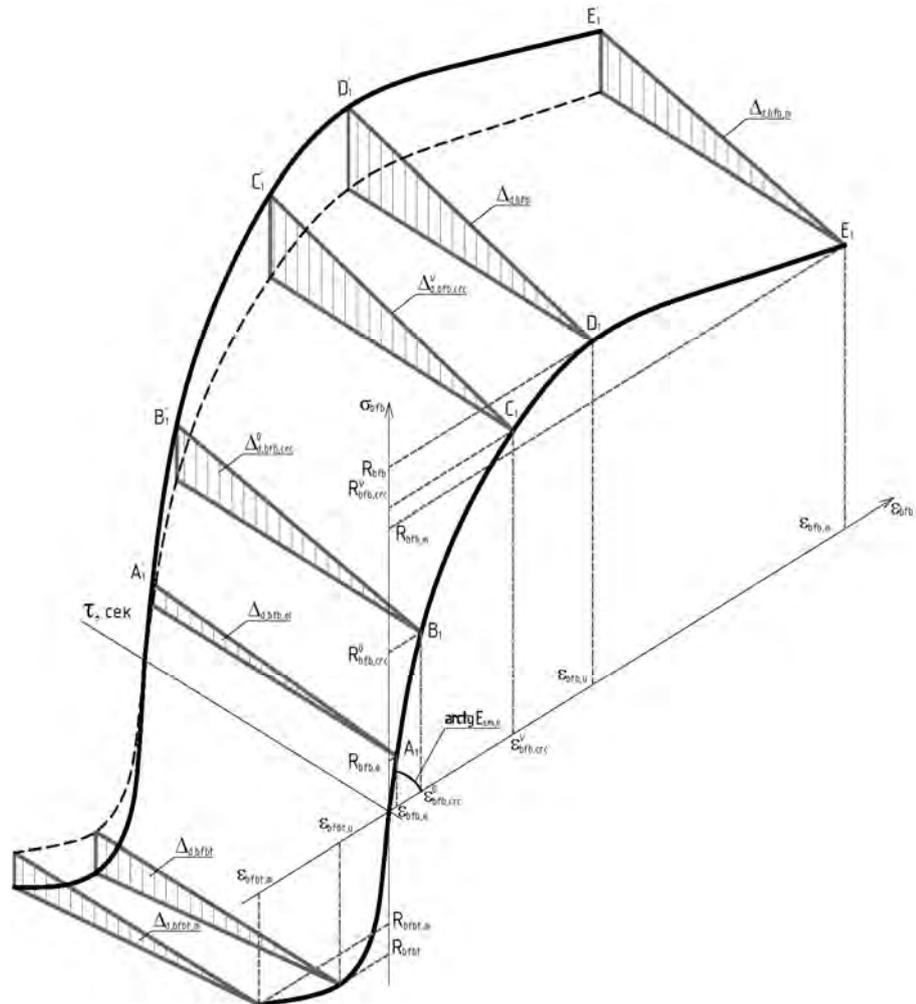


Рис. 9. Диаграмма нелинейного деформирования базальтофибробетона при кратковременном динамическом нагружении

Предложенные расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействии могут быть использованы при расчетах строительных конструкций по деформационной модели, которая позволяет оценить их напряженно-деформированное состояние на всех этапах загрузки конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Совершенствование технологии изготовления базальтофибробетона с повышенной однородностью / А.И. Кудряков, В.С. Плевков, К.Л. Кудряков, А.В. Невский, А.С. Ушакова // Строительные материалы. – 2015. – № 10. – С. 44–47.

2. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф.Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ. – 2004. – 560 с.
3. Войлоков, И.А. Базальтофибробетон. Исторический экскурс / И.А. Войлоков, С.Ф. Канаев // *Материалы. Инженерно-строительный журнал*. – 2009. – № 4. – С. 26–31.
4. Модель динамического разрушения фибробетона / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, В.С. Плевков, А.А. Югов, В.В. Шашков, К.Л. Кудряков, А.М. Устинов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2014. – № 5. – С. 63–76.
5. Ren, W. Dynamic compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures / W. Ren, J. Xu, H. Su // *Fire and materials*. – 2015. – DOI: 10.1002/fam.2339.
6. Лещинский, М.Ю. Испытание прочности бетона / М.Ю. Лещинский, Б.Г. Скрамтаев. – М. : Стройиздат, 1973. – 272 с.
7. Нелепов, А.Р. Методология обследований, оценки состояния, надежности и реконструкции зданий / А.Р. Нелепов. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2002. – 810 с.
8. Карпенко, Н.И. Нелинейное деформирование бетона и железобетона / Н.И. Карпенко, В.М. Круглов, Л.Ю. Соловьев. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2001. – 276 с.
9. Бондаренко, В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
10. Байков, В.Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.Н. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1977. – № 6. – С. 15–18.
11. Плевков, В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций / В.С. Плевков. – Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 1996. – 65 с.
12. Кумпяк, О.Г. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галаятдинов, Д.Н. Кокорин. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. – 277 с.
13. Попов, Н.Н. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.В. Забегав. – М. : Высшая школа, 1992. – 319 с.
14. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1970. – 273 с.
15. Bischoff, P.H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates / P.H. Bischoff, S.H. Perry // *Materials and Structures*. – 1991. – V. 24. – № 144. – P. 425–450.
16. Pająk, M. The influence of the strain rate on the strength of concrete taking into account the experimental techniques / M. Pająk // *Architecture civil engineering environment*. – 2011. – V. 3. – P. 77–86.

REFERENCES

1. Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Kudyakov K.L., Nevsky A.V., Ushakova A.S. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya bazal'tofibrobetona s povyshennoi odnorodnost'yu [Improvement of manufacturing technology of basalt fiber-reinforced concrete with increased uniformity]. *Construction Materials*. 2015. No. 10. Pp. 44–47. (rus)
2. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktсии [Fiber-reinforced concrete-based composites. Issues of theory, design, and technology]. Moscow : ASV Publ., 2004. 560 p. (rus)
3. Voilokov I.A., Kanaev I.A. Bazal'tofibrobeton. Istoricheskii ekskurs [Basalt fiber-reinforced concrete. Historical journey]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 4. Pp. 26–31. (rus)
4. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Plevkov V.S., Yugov A.A., Shashkov V.V., Kudyakov K.L., Ustinov A.M. Model' dinamicheskogo razrusheniya fibrobetona [Dynamic fracture model of fiber reinforced concrete]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 5. Pp. 63–76. (rus)
5. Ren W., Xu J., Su H. Dynamic compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire and Materials*. 2015. DOI: 10.1002/fam.2339.
6. Leshchinskii M.Yu., Skramtaev B.G. Ispytanie prochnosti betona [Test of concrete strength]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1973. 272 p. (rus)

7. *Nelepov A.R.* Metodologiya obsledovaniy, otsenki sostoyaniya, nadezhnosti i rekonstruktsii zdaniy [Methodology of inspection, technical condition assessment, reliability and reconstruction of buildings]. Omsk : SibADI Publ., 2002. 810 p. (rus)
8. *Karpenko N.I., Kruglov V.M., Solov'ev L.Yu.* Nelineinoe deformirovaniye betona i zhelezobetona [Nonlinear deformation of concrete and reinforced concrete]. Novosibirsk : SGUPS Publ., 2001. 276 p. (rus)
9. *Bondarenko V.M., Bondarenko S.V.* Inzhenernye metody nelineinoi teorii zhelezobetona [Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982. 287 p. (rus)
10. *Baikov V.N., Gorbatov S.V., Dimitrov Z.A.* Postroeniye zavisimosti mezhdu napryazheniyami i deformatsiyami szhatogo betona po sisteme normiruemykh pokazatelei [Establishment of dependencies between stress and strain of compressed concrete according to system of normed parameters]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1977. No. 6. Pp. 15–18. (rus)
11. *Plevkov V.S.* Dinamicheskaya prochnost' betona i armatury zhelezobetonnykh konstruktsii [Dynamic strength of concrete and rebar of reinforced concrete structures]. Tomsk : TsNTI Publ., 1996. 65 p. (rus)
12. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N.* Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsii na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports under dynamic loads]. Tomsk : TSUAB Publ., 2016. 277 p. (rus)
13. *Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.B.* Raschet konstruktsii na dinamicheskie i spetsial'nye nagruzki [Structural analysis under dynamic and specific loads]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1992. 319 p. (rus)
14. *Bazhenov Yu.M.* Beton pri dinamicheskom nagruzhenii [Concrete under dynamic loading]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1970. 272 p. (rus)
15. *Bischoff P.H., Perry S.H.* Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and Structures*. 1991. V. 24. No. 144. Pp. 425–450.
16. *Pajak M.* The influence of the strain rate on the strength of concrete taking into account the experimental techniques. *Architecture – Civil Engineering – Environment*. 2011. V. 3. Pp. 77–86.