

УДК 624.012.354

*УТКИН ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
udg70@mail.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ДЕФОРМИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ СТАЛЕФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Проведены экспериментальные исследования железобетонных элементов, имеющих зонное армирование из стальной фибры в сжатой зоне сечения и высокопрочную арматуру в растянутой зоне, при кратковременном динамическом изгибе. Получены новые экспериментальные данные, характеризующие процесс сопротивления сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным армированием, выявлены особенности деформирования, трещинообразования и разрушения таких конструкций при интенсивном динамическом нагружении. Сформулированы предпосылки и метод расчета изгибаемых сталефиброжелезобетонных конструкций со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении.

**Ключевые слова:** смешанное армирование; сталефибробетон; кратковременное динамическое нагружение; эксперимент; прочность.

*DMITRII G. UTKIN, PhD, A/Professor,  
udg70@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

### **DEFORMATION OF FIBER-REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENTS UNDER DYNAMIC LOAD**

The paper presents the experimental analysis of reinforced concrete elements having steel fiber reinforcement in compression zone and high-tensile reinforcement in tensile zone under the dynamic load. The new experimental data are obtained for the processes of resistance of fiber-reinforced concrete elements having a mixed reinforcement, deformation, crack propagation, and failure of such constructions under the intensive dynamic load. Prerequisites and the design technique for fiber-reinforced steel bending elements are presented herein in terms of the dynamic load.

**Keywords:** mixed reinforcement; fiber-reinforced concrete; dynamic load; experiment; strength.

В настоящее время при проектировании несущих строительных конструкций возникает необходимость учитывать возможность воздействия на них кратковременных динамических нагрузок аварийного характера. Такие нагрузки могут вызвать значительные деформации конструкций, их разрушение, что может привести к значительным материальным потерям, травмам и гибели людей.

Одним из новых и перспективных строительных материалов является сталефибробетон, повышенные прочностные и деформативные свойства которого были исследованы и проанализированы различными российскими и зарубежными учеными [1–6].

Применение высокопрочной арматуры в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов эффективно для предварительно напряженных конструкций. В литературе имеется ряд публикаций, посвященных исследованию изгибаемых железобетонных конструкций со смешанным и сталефибровым армированием при статическом нагружении [4, 5]. В этих публикациях отмечено, что такое армирование позволило добиться повышения несущей способности и деформативности конструкций при статическом нагружении. При кратковременном динамическом нагружении подобные исследования не проводились.

Таким образом, задача изучения влияния смешанного армирования на работу изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении является весьма актуальной при расчете и проектировании экономичных и надежных железобетонных конструкций.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных балок с зонным сталефибровым армированием сжатой зоны сечения, высотой слоя фибробетона 60 мм. В качестве растянутых рабочих стержней была применена высокопрочная арматура класса Вр1500 (Вр-II) без предварительного напряжения отдельно и совместно со стержневой арматурой класса А400 (А-III). Для сопоставления результатов эксперимента была изготовлена и испытана сталефиброжелезобетонная балка без применения высокопрочной арматуры. Программа эксперимента представлена на рис. 1.

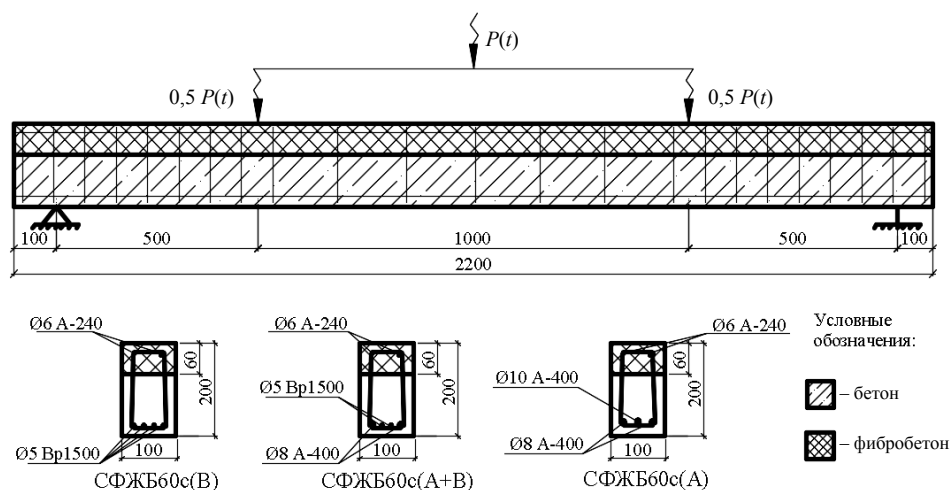


Рис. 1. Программа экспериментальных исследований и конструкция экспериментальных образцов

Длина экспериментальных балок составляла 2200 мм, расчетный пролет – 2000 мм, поперечное сечение – 100×200 мм.

Балки имели различное армирование растянутой зоны для:

- СФЖБ60с(В) – 4 $\varnothing$ 5 Вр1500 (Вр-II);
- СФЖБ60с(А+В) – 2 $\varnothing$ 8 А400 (А-III) + 2 $\varnothing$ 5 Вр1500 (Вр-II);
- БФЖБ60 – 2 $\varnothing$ 12 А400 (А-III).

С каждым видом армирования было испытано по одной балке.

Для всех балок арматура сжатой зоны выполнена из двух стержней арматуры 2 $\varnothing$ 6 А240 (А-I). Поперечная арматура была выполнена в виде гнутых хомутов из проволоки  $\varnothing$ 5 В500 (Вр-I).

Балки содержали одинаковый процент зонного фибрового армирования по объему – 2 %. Для изготовления конструкций применялась фибра, нарезанная из стальной полосы, сечением 0,4 $\times$ 0,6 мм, длиной 40 мм по ТУ 67-987–88.

Испытание при кратковременном динамическом изгибе производилось на стенде, представляющем собой копровую установку (рис. 2). Нагрузка на балку передавалась в четвертях расчетного пролета через распределительную траверсу. Нагружающий элемент массой 390 кг фиксировался на высоте 600 мм. Затем при помощи грузосбрасывателя происходило отцепление груза, который после свободного падения ударял по балке через систему демпфирующих прокладок.



Рис. 2. Общий вид стенда для испытания экспериментальных балок

Величина динамической нагрузки определялась при помощи силоизмерителя типа 4126ДСТ. Измерение величины опорных реакций осуществлялось с помощью динамометрических опор с наклеенными на них тензорезисторами. Для измерения деформаций бетона, арматуры и сталефибробетона использовались проволочные тензорезисторы базой 10 мм для измерения деформаций арматурных стержней и базой 50 мм для измерения деформаций бетона и сталефибробетона.

Перемещения и ускорения экспериментальных образцов при кратковременном динамическом нагружении определялись при помощи пяти датчиков линейных перемещений и акселерометров, расположенных по длине балки на одинаковом расстоянии друг от друга. Измерительная станция, к которой подключались первичные преобразователи информации, состоит из измерительно-вычислительных комплексов МИС-300 и МИС-400 и узла синхронизации эксперимента.

В результате проведенного эксперимента все балки были разрушены по нормальному сечению. При обработке данных первичных преобразователей были получены зависимости изменения во времени для динамической нагрузки, опорных реакций, деформаций бетона, арматуры, сталефибробетона, ускорений и перемещений.

Схемы разрушения и трещинообразования балок представлены на рис. 3.

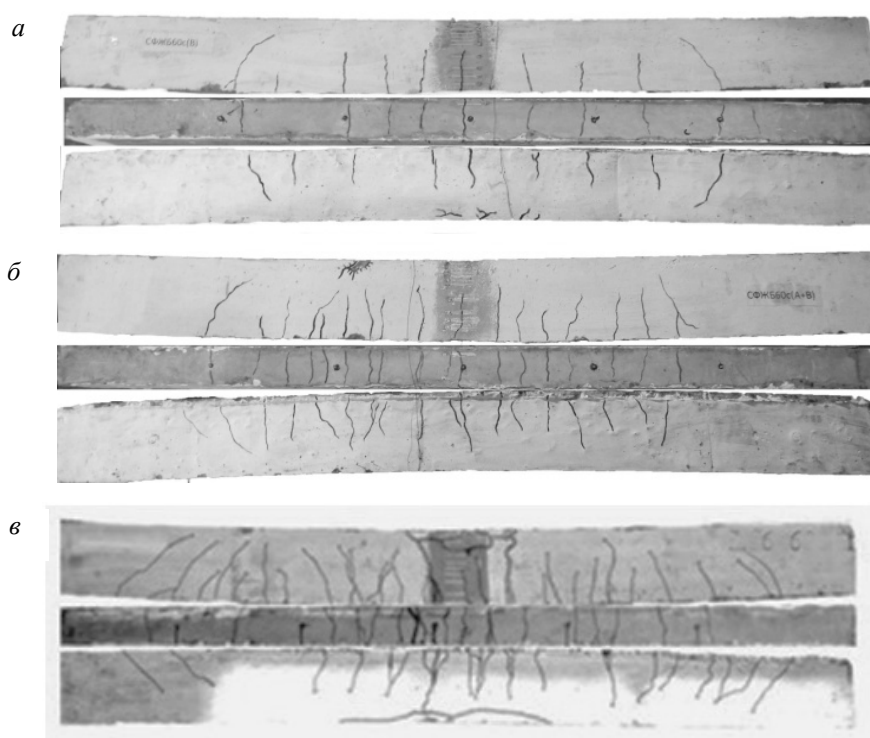


Рис. 3. Схемы разрушения и трещинообразования экспериментальных балок:  
а – СФЖБ60с(В); б – СФЖБ60с(А+В); в – БФЖБ60

Из представленных схем видно, что на балке, армированной только стержневой арматурой, наблюдается разрушение сжатой зоны бетона с многочисленным образованием нормальных трещин в растянутой зоне по длине балки. У остальных балок разрушение сжатой зоны не наблюдается, причем у балки, армированной только высокопрочной арматурой, количество нормальных трещин по длине балки меньше, чем у балки, армированной высокопрочной арматурой совместно со стержневой.

На рис. 4 представлены характерные зависимости изменения динамической нагрузки во времени для экспериментальных балок.

Из графика видно, что у балки, армированной высокопрочной проволокой совместно со стержневой арматурой, значение разрушающей динамической нагрузки на 25 % выше, чем у двух других балок.

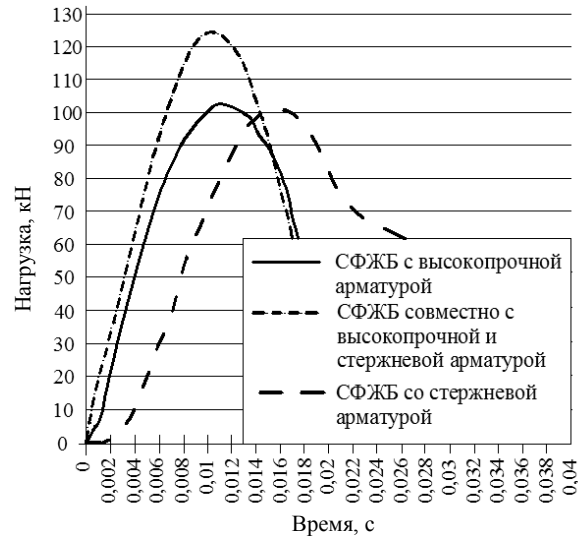


Рис. 4. Характерные зависимости изменения динамической нагрузки во времени

Характерный график изменения опорных реакций и динамической нагрузки с течением времени представлен на рис. 5.

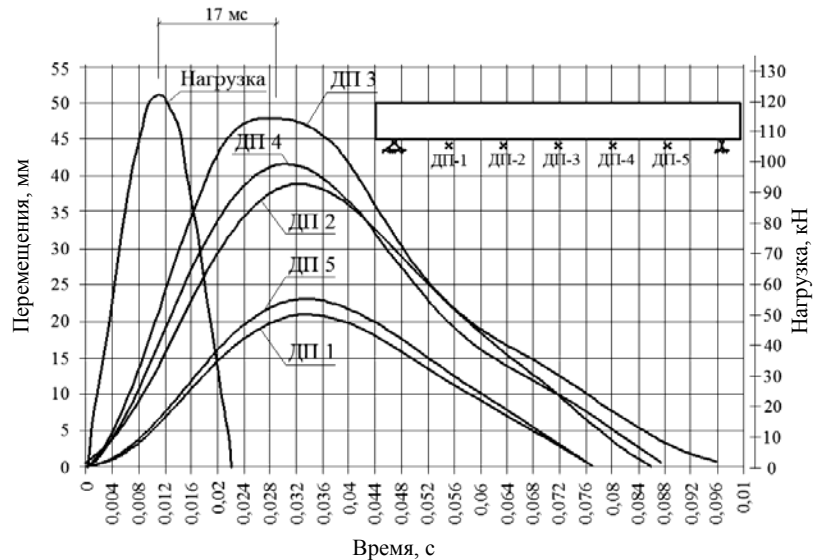


Рис. 5. Характерные изменения перемещений балок в различных точках с течением времени

Анализ изменения опорных реакций показал, что их значения составляли примерно половину от максимального значения динамической нагрузки, при этом запаздывание пика максимума опорных реакций от пика максимума динамической нагрузки составляло в среднем 9 мс.

В ходе проведения экспериментальных исследований производилась фиксация изменения перемещений балок (в пяти равноудаленных друг от друга точках) во времени. После обработки данных были построены характерные зависимости изменения перемещений с течением времени (рис. 5). Сопоставление максимальных перемещений для всех испытываемых балок показано на рис. 6.

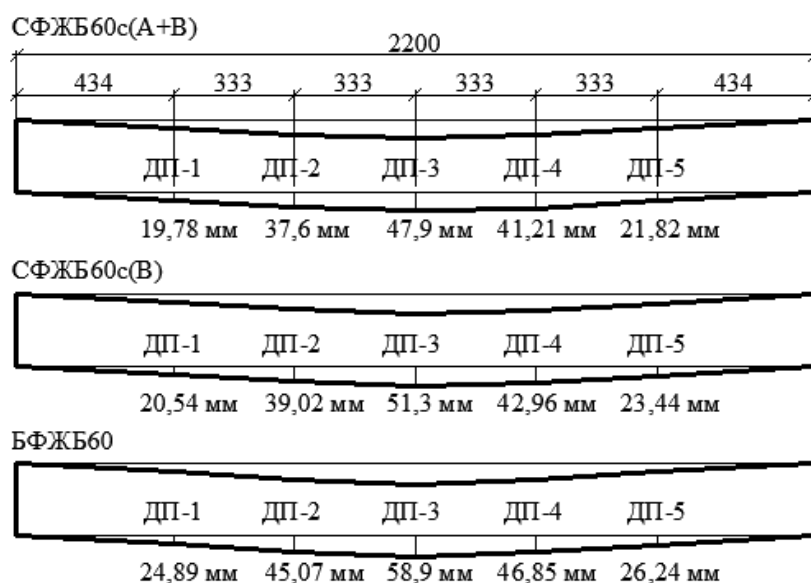


Рис. 6. Максимальные значения перемещений экспериментальных балок при кратковременном динамическом нагружении

Анализ перемещений испытываемых балок показал, что у балок, армированных только высокопрочной проволокой и высокопрочной проволокой совместно со стержневой арматурой, значения перемещений на 14–18 % ниже, чем у балки, армированной только стержневой арматурой в растянутой зоне. При этом у балки, армированной только высокопрочной арматурой, перемещения выше на 6,6 %, чем у балки, армированной высокопрочной совместно со стержневой арматурой. Запаздывание пика максимума перемещений от пика максимума динамической нагрузки составляло в среднем 17 мс.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента было установлено, что применение высокопрочной проволоки совместно со стержневой арматурой в сталефиброжелезобетонных балках приводит к повышению несущей способности и снижению деформативности конструкции.

Предпосылками для расчета сталефиброжелезобетонных элементов при статическом и кратковременном динамическом нагружении являются диа-

граммы деформирования бетона, фибробетона и арматуры, аналитическое описание которых получено на основе обобщения имеющихся экспериментальных данных. Основные параметрические точки на диаграммах при кратковременном динамическом нагружении трансформируются вдоль временной координаты. Аналитическое описание коэффициентов динамического упрочнения для бетона и арматуры получено на основе логарифмических зависимостей профессоров Ю.М. Баженова и Г.И. Попова [7–9].

Диаграмма деформирования и коэффициенты динамического упрочнения для сталефибробетона предложены с учетом работ В.И. Григорьева [10], Л.Г. Курбатова, Ф.Н. Рабиновича [11].

В рамках теоретических исследований разработан инженерный метод расчета прочности нормальных сечений изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным и сталефибровым армированием при помощи областей относительного сопротивления по прочности при кратковременном динамическом нагружении, основанный на жесткопластической модели материалов [12].

Условия относительной прочности нормальных сечений изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов определены с использованием предельных значений расчетных сопротивлений для арматуры, бетона и фибробетона при растяжении и сжатии. Предельные изгибающие моменты и продольная сила, воспринимаемые элементом, приняты относительно центра тяжести сечения.

Графически область относительного сопротивления для изгибаемого железобетонного элемента с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне и высокопрочным армированием в растянутой зоне сечения элемента представлена на рис. 7.

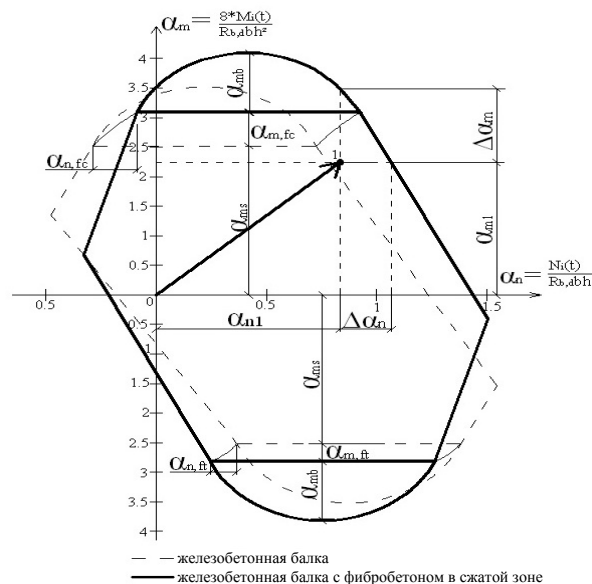


Рис. 7. Область относительного сопротивления в координатах  $\alpha_m$ ,  $\alpha_n$  для изгибаемого железобетонного элемента с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне сечения элемента при кратковременном динамическом нагружении

Данный метод позволяет наглядно оценить прочность изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов путем векторного представления относительных действующих усилий, возникающих в нормальных сечениях от внешних воздействий.

Разность ( $\Delta\alpha_n$ ,  $\alpha_m$ ) между значениями действующих относительных усилий и предельных усилий, воспринимаемых сечением, названа компонентами запаса прочности сечения сталефиброжелезобетонного элемента. При положительном их значении условия прочности рассматриваемого элемента выполняются, в противном случае – не выполняются.

Сопоставление результатов расчета и эксперимента дало удовлетворительную сходимость между собой, равную 14–15 % в сторону запаса прочности.

### Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении, которые позволили получить новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления сталефиброжелезобетонных конструкций: изменение перемещений, характер изменения динамической нагрузки и опорных реакций во времени на различных стадиях динамического деформирования конструкции в зависимости от параметров армирования растянутой зоны сечения.

2. Установлено, что применение высокопрочной арматуры класса Вр-II совместно со стержневой класса А400С повышает несущую способность сталефиброжелезобетонного элемента в среднем на 20 % по сравнению со сталефиброжелезобетонным элементом, армированным только высокопрочной арматурой класса Вр1500, и на 16 % по сравнению со сталефиброжелезобетонным элементом, армированным стержневой арматурой класса А400С в растянутой зоне сечения.

3. Разработан аналитический метод расчета изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении, позволяющий с точностью, достаточной для решения практических задач, определять несущую способность изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным армированием.

4. Результаты проведенных расчетов по данному методу показали удовлетворительную (14–15 %) сходимость с экспериментальными данными.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумпяк, О.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, Д.Г. Копаница. – Нортхэмптон ; Томск, 2002. – 334 с.
2. Плевков, В.С. Прочность железобетонных элементов с армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин // Научно-технический журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». – М., 2014. – № 5. – С. 38–44.



3. Плевков, В.С. Работа изгибаемых и сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин // Механика разрушения строительных материалов и конструкций. Материалы VIII Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции. – Казань, 2014. – С. 237–244.
4. Морозов, В.И. Исследования фиброжелезобетонных колонн с высокопрочной арматурой / В.И. Морозов, А.О. Хегай // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №3(28). – С. 34–37.
5. Морозов, В.И. Расчет изгибаемых элементов с высокопрочной арматурой с фибровым армированием растянутых зон / В.И. Морозов // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 2. – С. 36–39.
6. Корсун, В.И. / Влияние косвенного и фибрового армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона / В.И. Корсун, А.В. Корсун, С.Н. Машталер // Механика разрушения строительных материалов и конструкций. Материалы VIII Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции. – Казань, 2014. – С. 132–138.
7. Попов, Н.Н. Динамический расчет железобетонных конструкций / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М. : Стройиздат, 1974. – 207 с.
8. Попов, Н.Н. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М. : Стройиздат, 1980. – 189 с.
9. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов // М. : Стройиздат, 1970. – 270 с.
10. Григорьев, В.И. О коэффициенте динамического упрочнения сталефибробетона при растяжении / В.И. Григорьев // Исследование и расчет пространственных конструкций гражданских зданий : сб. науч. тр. – Л., 1985. – С. 95–99.
11. 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.
12. Уткин, Д.Г. Экспериментальные исследования сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / Д.Г. Уткин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 3. – С. 156–164.

#### REFERENCES

1. Kumpyak O.G., Kopanitsa D.G. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh sooruzhenij pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformation of ferro-concrete constructions at dynamic load]. Northampton; Tomsk, 2002. 334 p. (rus)
2. Plevkov V.S., Utkin D.G. Prochnost' zhelezobetonnyh elementov s armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength of ferro-concrete fiber-reinforced steel elements under dynamic load]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2014, No. 5. Pp. 38–44. (rus)
3. Plevkov V.S., Utkin D.G. Rabota izgibaemyh i szhato-izognutyh stalefibrozhelezobetonnyh elementov pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Behavior of bending and beam columns steel fiber-reinforced concrete elements under dynamic load]. *Proc. Int. Conf. 'Fracture Mechanics of Construction Materials and Structures'*, 2014. Pp. 237–244. (rus)
4. Morozov V.I., Hegai A.O. Issledovania fibrozhelezobetonnyh kolonn s vysokoprochnoi armaturoi [Research of fiber-reinforced steel concrete columns with high-tensile reinforcement]. *Vestnik grazhdanskikh ingenerov*. 2011. No. 3. Pp. 34–37. (rus)
5. Morozov V.I. Raschet izgibaemyh elementov s vysokoprochnoi armaturoj s fibrovym armirovaniem rastjanutyh zon [Bending element design having fiber-reinforcement in tensile zones]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2007. No. 2. Pp. 36–39. (rus)
6. Korsun V.I., Korsun A.V., Mashtaler S.N. Vliyanie kosvennogo i fibrovogo armirovanija na prochnost' i deformatsii jelementov iz vysokoprochnogo modifitsirovannogo betona [Indirect and fiber-reinforcement vs. durability and deformation of modified-concrete elements]. *Proc.*

- Int. Conf. 'Fracture Mechanics of Construction Materials and Structures'*, 2014. Pp. 132–138. (rus)
7. *Popov N.N., Rastorguev B.S.* Dinamicheskii raschet zhelezobetonnykh konstruksii [Dynamic analysis of ferroconcrete elements]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 207 p. (rus)
  8. *Popov N.N., Rastorguev B.S.* Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsial'nykh sooruzhenii [Design of specific constructions]. Moscow : Stroyizdat, 1980. 189 p. (rus)
  9. *Bazhenov Yu.M.* Beton pri dinamicheskom nagruzhении [Concrete under dynamic load]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 270 p. (rus)
  10. *Grigor'ev V.I.* O koeffitsiente dinamicheskogo uprochneniya stalefibrobetona pri rastyazhenii [Dynamic strengthening factor of fiber-reinforced steel concrete under tensile load]. Issledovanie i raschet prostranstvennykh konstruksii grazhdanskikh zdaniy. Coll. Papers. 1985. Pp. 95–99. (rus)
  11. *Rabinovich F.N.* Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii [Fiber-reinforced concrete composites. Problems of theory design, and technology]. Moscow: ASV Publ., 2004. 560 p. (rus)
  12. *Utkin D.G.* Eksperimental'nye issledovaniya szhato-izognutykh zhelezobetonnykh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental research of ferroconcrete beam columns with fiber-reinforcement from under dynamic load]. *Vestnik TSUAB*. 2008. No. 3. Pp. 156–164. (rus)