

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*

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

В статье представлены результаты исследований изгибаемых сталефиброжелезобетонных конструкций с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне сечения совместно с высокопрочной арматурой в растянутой зоне при статическом и 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*

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

The paper presents the experimental research of bending elements having steel fiber reinforcement in compression zone and high-strength reinforcement in tensile zone under static and dynamic loads. 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 structures under the intensive dynamic load are studied herein. Prerequisites and the design technique for fiber-reinforced steel bending elements are given in terms of the dynamic load.

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

В процессе проектирования строительных конструкций зданий и сооружений обязательным условием является учет возможности действия на них интенсивных динамических нагрузок и воздействий. Такие нагрузки могут вызвать потерю несущей способности и чрезмерные деформации железобетонных конструкций, их разрушение. Подобные воздействия могут привести к серьезным экономическим последствиям и человеческим жертвам.

Преимущества сталефибробетона по сравнению с бетоном, в частности повышенные его прочностные, деформативные характеристики, не вызывают сомнения и исследованы рядом российских и зарубежных ученых [1–7].

До сих пор неизученным остается вопрос эффективного использования высокопрочной арматуры без предварительного напряжения в растянутой зоне железобетонных конструкций. При таком применении возникает необходимость усиления сжатой зоны сечения во избежание хрупкого разрушения конструкции. Исследования эффективности использования высокопрочной арматуры в сочетании с сталефибровым армированием для статически работающих конструкций нашли свое отражение в ряде литературных источников [9–11]. Работа таких конструкций при воздействии на них динамических нагрузок не исследовалась.

В связи с этим выявление эффекта применения совместно сталефибрового и высокопрочного армирования на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций, работающих в условиях кратковременного динамического нагружения, является важным условием при расчете и проектировании экономичных и надежных железобетонных конструкций.

Для выполнения данной задачи запланирована и реализована программа экспериментальных исследований на изгиб четырех сталефиброжелезобетонных балок. Высота сталефибробетонного слоя в сжатой зоне сечения принималась 60 мм. Рабочая арматура для балок принята из высокопрочной проволоки Вр1400 для одного варианта. Для другого варианта принято армирование из проволоки Вр1400 совместно с арматурой класса А500. Для третьего варианта принято рабочее армирование в растянутой зоне из арматуры класса А800. Также в целях сравнения результатов и выявления эффекта применение высокопрочной арматуры в растянутой зоне, была исследована железобетонная балка, армированная обычной арматурой из мягкой стали. Программа эксперимента представлена на рис. 1.

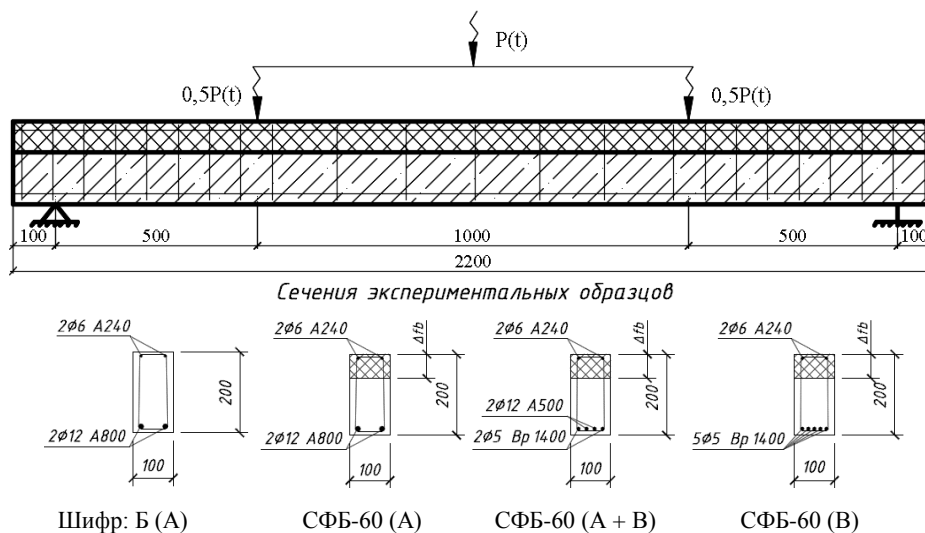


Рис. 1. Программа экспериментальных исследований и конструкция экспериментальных образцов

Длина экспериментальных балок составляла 2,2 м, расчетный пролет балок – 2,0 м, поперечное сечение – 100×200 мм.

Все экспериментальные образцы армировались пространственными каркасами. В нижней зоне железобетонных балок применялась арматура из 2Ø12 A800; 5Ø5 Вр1400 и 2Ø5 Вр1400 совместно с 2Ø12 A500. В сжатой зоне сечения располагалась арматура из 2Ø6 A240. Поперечная арматура – гнутые хомуты из проволоки Ø4 Вр500.

Процент зонного сталефибрового армирования принят 2 % по объему для всех образцов.

Испытание экспериментальных образцов на кратковременную динамическую нагрузку производилось на стенде, который представляет собой копровую установку (рис. 2). Масса груза составляла 400 кг, им ударяли по балке с высоты 600 мм в четвертях пролета балки. Воздействие нагружающего элемента на балку производилось через систему прокладок в целях обеспечения демпфирования удара и растягивания динамической нагрузки во времени.

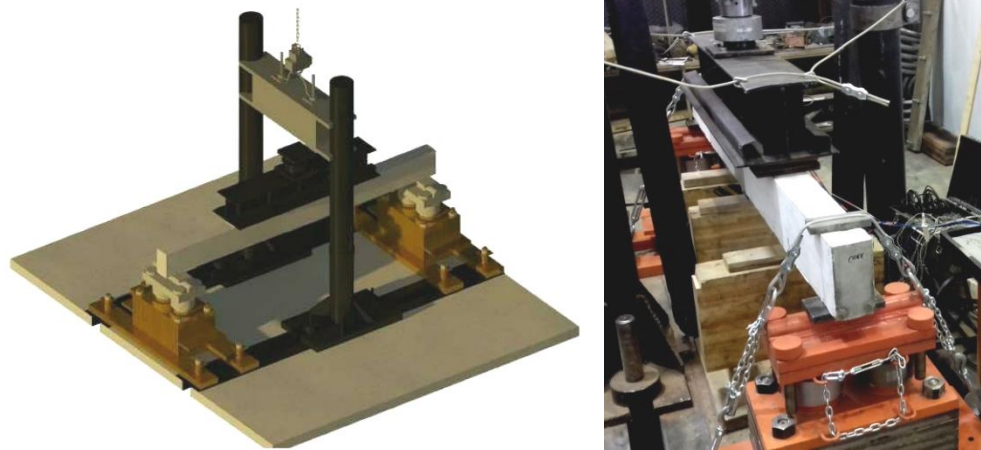


Рис. 2. Копровая установка для испытания конструкций

Значение кратковременной динамической нагрузки фиксировалось с помощью датчика силоизмерителя. Фиксация значений реакции системы осуществлялась по сигналам тензорезисторов, наклеенных на динамометрические опоры. Для измерения значений деформаций материалов использовались тензорезисторы базой 50 и 20 мм.

Значения перемещений и ускорений балок определялись при помощи прогибомеров и датчиков ускорений, расположенных по пять штук снизу балки.

По результатам проведенных экспериментальных исследований все образцы были разрушены по нормальному сечению. В результате обработки и анализа данных применяемых приборов и датчиков получены графики изменения во времени действия кратковременной динамической нагрузки для реакции системы, нагрузки, относительных деформаций материалов конструкции, прогибов и ускорений балок.

Схемы разрушения и образования трещин у экспериментальных образцов представлены на рис. 3.

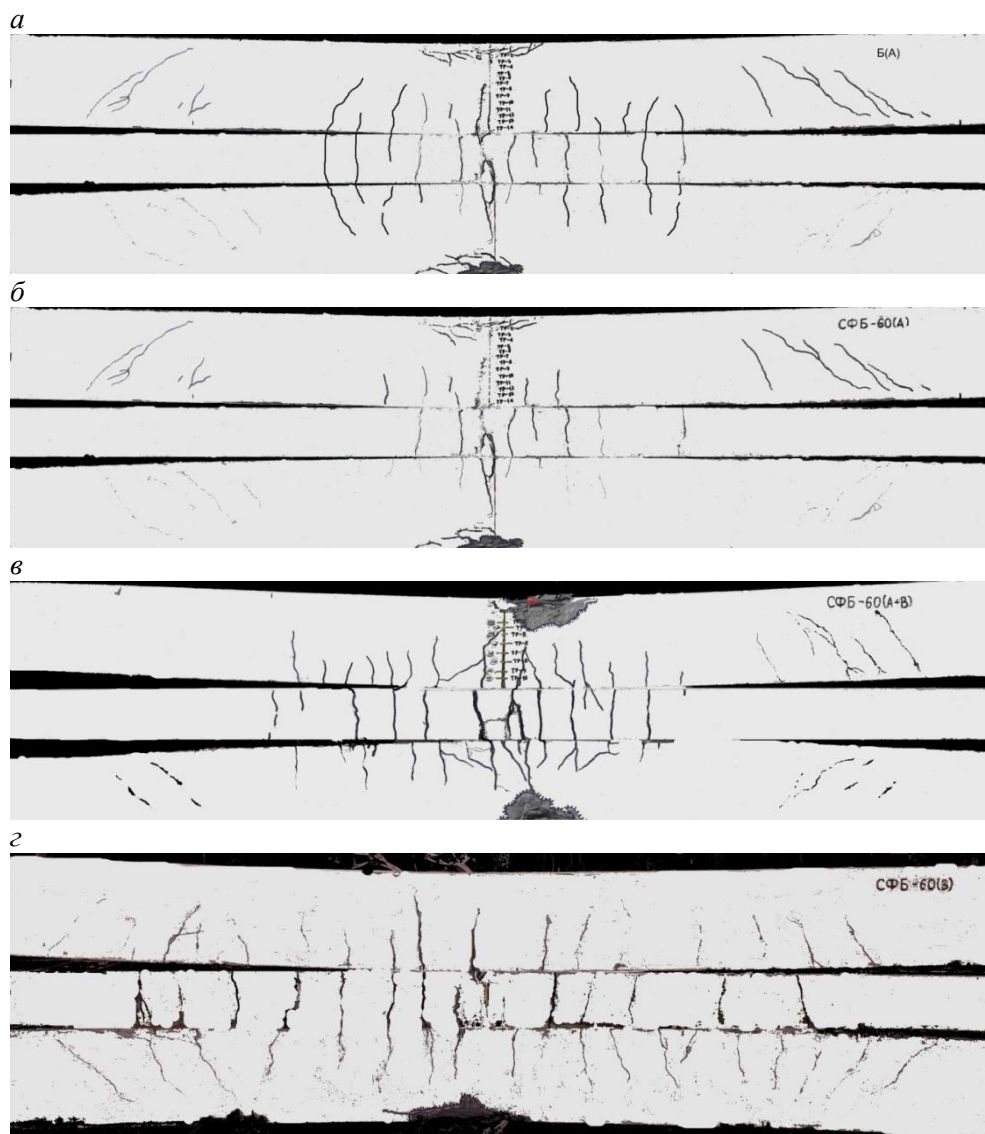


Рис. 3. Схемы разрушения и трещинообразования экспериментальных балок:  
а – Б(А); б – СФБ-60(А); в – СФБ-60(А + В); г – СФБ-60(В)

Из рис. 3 следует, что у образца, армированного стержневой арматурой, разрушение в сжатой зоне сечения, выражено сильнее чем у остальных образцов. Кроме того, отмечено развитие большего числа трещин в нижней зоне сечения вдоль балки. При анализе схем разрушения остальных образцов не выявлено явного разрушения в сжатой зоне сечения. У балок, армированных стержневой арматурой совместно с высокопрочной, количество нормаль-

ных трещин по длине балки превышает количество трещин, выявленных при разрушении балок, армированных исключительно высокопрочной арматурой.

На рис. 4 представлена диаграмма изменения несущей способности железобетонных образцов в зависимости от армирования.

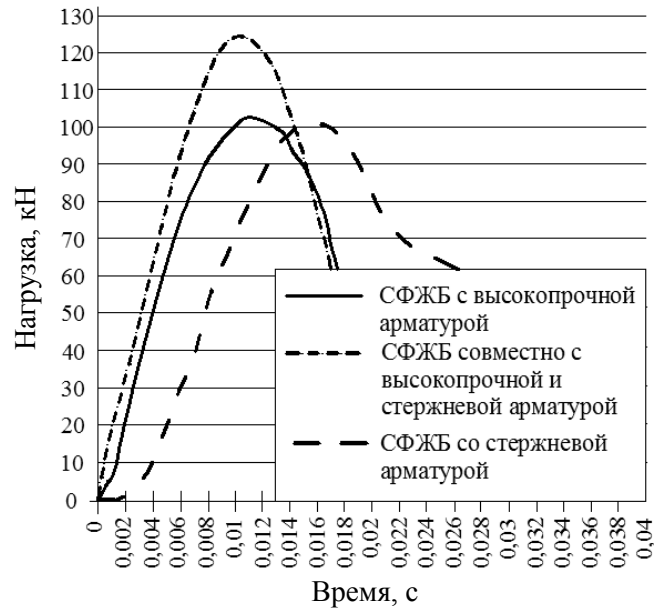


Рис. 4. Характерные зависимости изменения динамической нагрузки во времени

В ходе анализа влияния величины зонного сталефибрового армирования и различных классов высокопрочной арматуры на несущую способность железобетонных элементов выявлено, что:

– применение зонного сталефибрового армирования для изгибаемых железобетонных элементов в сжатой зоне сечения повышает их несущую способность в среднем на 14–16 %;

– применение армирования в растянутой зоне из арматуры 2Ø12 А800 наиболее эффективно по сравнению с 5Ø5 Вр1400 и 2Ø5 Вр1400 совместно с 2Ø12 А500;

– наибольший эффект на несущую способность железобетонных элементов оказывает применение зонного сталефибрового армирования сжатой зоны совместно с арматурой А800 в растянутой зоне сечения.

В ходе проведения экспериментальных исследований производилась фиксация изменения перемещений балок (в пяти равноудаленных друг от друга точках) во времени. В результате анализа полученных данных представлены характерные графики развития перемещений по длине балок с изменением кратковременной динамической нагрузки и времени ее действия (рис. 5).

Значения максимальных перемещений для сталефиброжелезобетонных балок уменьшаются по сравнению с железобетонным образцом в среднем на 30–35 % при применении сталефибробетона в сжатой зоне сечения. При этом

при использовании в растянутой зоне арматуры класса А800 значения перемещений уменьшаются в среднем на 27–32 % по сравнению с использованием арматуры класса Вр1400.

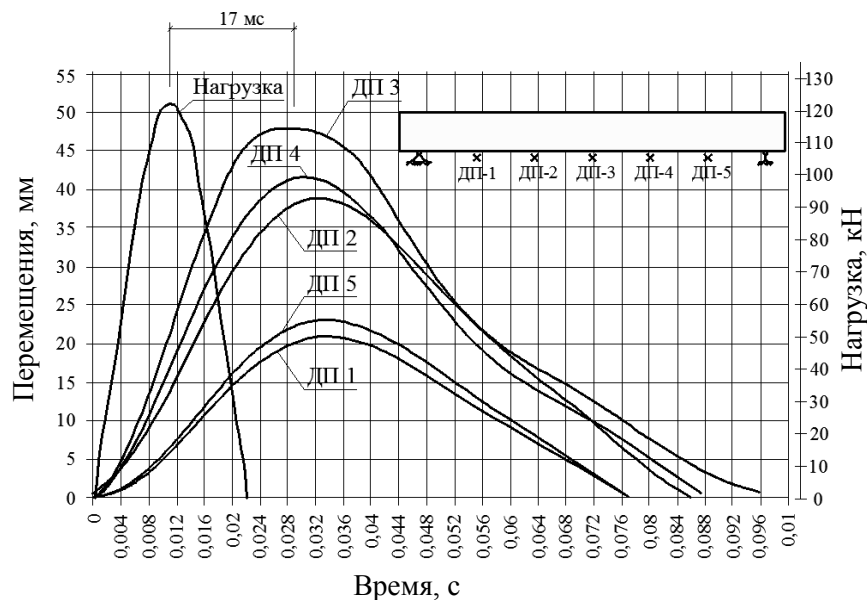


Рис. 5. Характерные зависимости изменения перемещений балок в различных точках с течением времени

Итогом проведенных экспериментальных исследований явилось установление, что совместное рабочее армирование растянутой зоны сталефибробетонных конструкций из высокопрочной и обычной арматуры приводит к увеличению прочности нормальных сечений и снижению перемещений конструкции по сравнению с конструкциями, армированными только высокопрочной проволокой или только стержневой арматурой в растянутой зоне сечения.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают разработанный метод расчета прочности нормальных сечений железобетонных конструкций со смешанным высокопрочным и обычным армированием растянутой зоны и фибровым армированием сжатой зоны. Метод расчета осуществляется при помощи областей относительной прочности для конструкций, работающих при статическом и динамическом нагружении [6].

Предпосылками для разработанного метода расчета служат нелинейные диаграммы «напряжение – деформации» для сталефибробетона, бетона и арматуры, описание в аналитической форме для которых получено на основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных. Значения деформаций и напряжений на диаграммах при кратковременном динамическом нагружении изменяются по нелинейной схеме вдоль координаты изменения времени действия нагрузки. Описание коэффициентов динамического упрочнения для бетона, сталефибробетона и арматуры принято из литературных источников [8–12].

В процессе определения внутренних усилий происходит разбиение сталефиброжелезобетонного элемента на заранее определенное количество этапов (рис. 6), на каждом из которых вычисляются геометрические значения (высота сжатой зоны фибробетона), определяются относительные деформации бетона, сталефибробетона и арматуры.

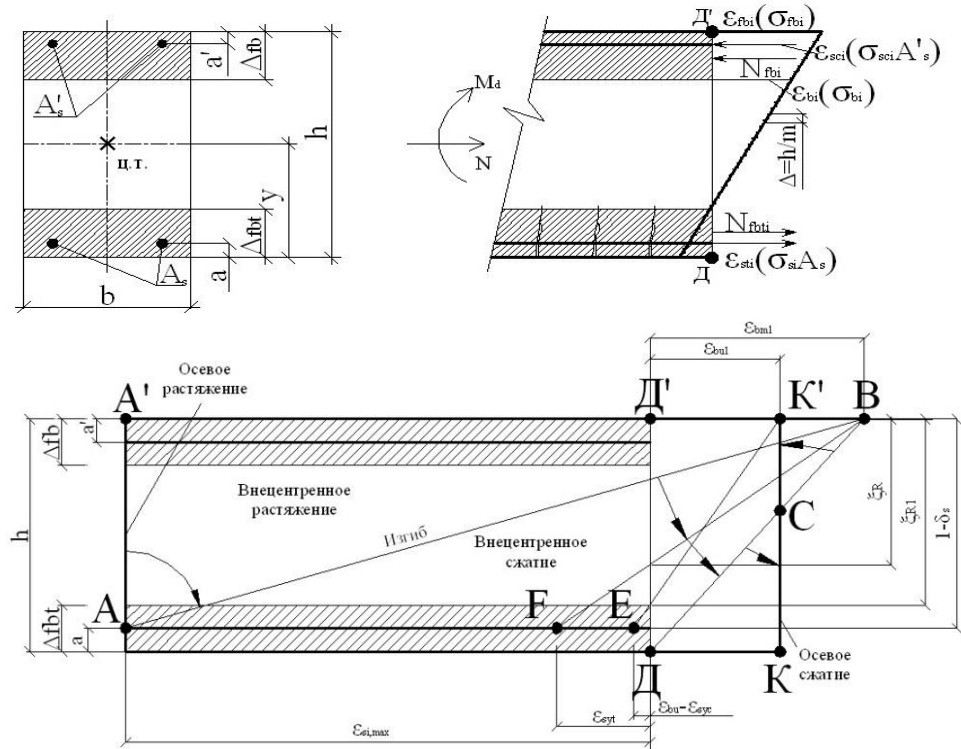


Рис. 6. Расчетная модель, характеризующая последовательность развития деформаций в нормальном сечении сталефиброжелезобетонного элемента в зависимости от вида нагружения

В дальнейшем, по зависимостям в аналитическом их описании, для материалов конструкции происходит определение напряжений в каждом материале по полученным значениям относительных деформаций. После осуществляется суммирование средних в каждом слое значений усилий в абсолютных и относительных единицах. По результатам расчетов вычисляются предельные относительные изгибающие моменты и продольные усилия, возникающие в нормальном сечении сталефиброжелезобетонного элемента. Данная комбинация внутренних усилий является координатами для области относительной прочности нормального сечения элемента при статическом или кратковременном динамическом нагружении.

Вычисленные области относительной прочности (рис. 7) позволяют оценить прочность сталефиброжелезобетонного элемента при каждом виде сочетания изгибающих моментов и продольных сил при любом виде напряженно-деформированного состояния конструкции: растяжение, сжатие, изгиб.

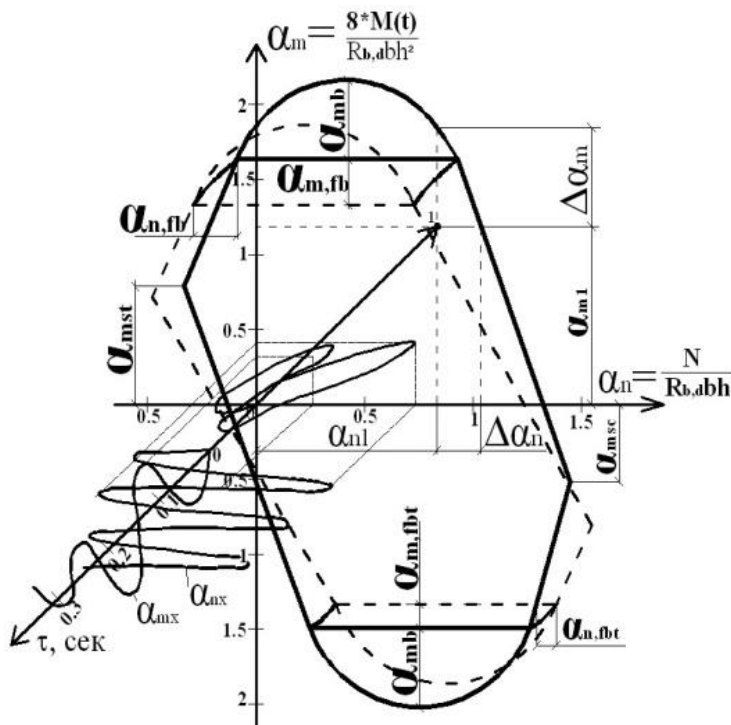


Рис. 7. Область относительного сопротивления в координатах  $\alpha_m, \alpha_n$

В результате дальнейшего наложения на полученную область относительной прочности вектора при статическом нагружении или следа при кратковременном динамическом нагружении появляется наглядное представление о имеющемся запасе по прочности изгибаемого элемента или его перегрузке (в случае выхода вектора или следа за пределы области).

Разность ( $\Delta\alpha_n, \Delta\alpha_m$ ) между полученными значениями действующих нагрузок или комбинаций нагрузок и воздействий в относительных единицах и предельными значениями, возникающими в результате такого воздействия внутренних усилий, называется коэффициентом запаса по прочности для нормального сечения элемента. В случае их положительного значения считается, что условие по прочности нормального сечения конструкции выполняется, в случае отрицательного значения имеется перегрузка конструкции.

Результаты расчетов по соотношению с экспериментальными данными сходятся в пределах 14–15 % с большим значением в сторону экспериментальных показателей.

### Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований прочности и деформативности изгибаемых сталефибробетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне и с высокопрочной арматурой в растянутой зоне сечения получены новые опытные данные, ха-



рактизирующие процесс сопротивления и перемещения таких элементов при воздействии на них кратковременной динамической нагрузки.

2. Полученные экспериментальные данные позволили определить самое эффективное, с позиции увеличения несущей способности и уменьшения прогибов, армирование из высокопрочной арматуры для изгибаемых сталефиброжелезобетонных конструкций.

3. Разработан метод расчета таких элементов на основе нелинейной деформационной модели с использованием действительных диаграмм деформирования материалов с помощью областей относительного сопротивления по прочности, позволяющий наглядно графически и аналитически определять на любом этапе нагружения конструкции значения расчетных усилий, коэффициенты запаса по прочности нормальных сечений или перегрузку.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Плевков, В.С. Прочность железобетонных элементов с армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 5. – С. 38–44.
3. Кумпяк, О.Г. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных балок на податливых опорах по наклонным сечениям при сейсмических и других динамических нагружениях / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Н. Кокорин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 1. – С. 40–45.
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. Плевков, В.С. Прочность и деформативность железобетонных элементов с зонным фибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин, А.Е. Карпов // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия : сб. докладов Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова (19–20 апреля 2016 г., Москва). – 2016. – С. 342–348.
7. Кумпяк, О.Г. Железобетонные плиты на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, В.Б. Максимов // Бетон и железобетон. – 2014. – № 5. – С. 16–19.
8. Попов, Н.Н. Динамический расчет железобетонных конструкций / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М. : Стройиздат, 1974. – 207 с.
9. Попов, Н.Н. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М. : Стройиздат, 1980. – 189 с.
10. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1970. – 270 с.
11. 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.
12. 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.

## REFERENCES

1. *Utkin D.G.* Eksperimental'nye issledovaniya szhato-izognutykh zhelezobetonnykh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Experimental research of ferroconcrete beam columns with fiber-reinforcement from under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2008. No. 3. Pp. 156–164. (rus)
2. *Plevkov V.S., Utkin D.G.* Prochnost' zhelezobetonnykh 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. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N.* Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh po naklonnym secheniyam pri seismicheskikh i drugikh dinamicheskikh nagruzheniyakh [Experimental and theoretical study of reinforced concrete beams on elastic supports on oblique planes under seismic and other dynamic loads]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2013. No. 1. Pp. 40–45. (rus)
4. *Morozov V.I., Hegai A.O.* Issledovaniya fibrozhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoj armaturoj [The reseafch of steel fibre reinforced concrete columns with high-strength reinforced bars] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No. 3 (28). Pp. 34–37. (rus)
5. *Morozov V.I., Hegai A.O.* Issledovaniya fibrozhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoi armaturoi [Research of fiber-reinforced steel concrete columns with high-tensile reinforcement]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No.3. Pp. 34-37. (rus)
6. *Plevkov V.S., Utkin D.G., Karpov A.E.* Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh elementov s zonnym fibrovym armirovaniem pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete elements with fiber reinforcement under dynamic load]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Accidental Exposure Calculation for Reinforced Concrete Structures and Buildings'*. 2016. Pp. 342–348. (rus)
7. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B.* Zhelezobetonnye plity na podatlivykh oporah pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Concrete slab on pliable supports under dynamic load]. *Beton i zhelezobeton*. 2014. No. 5. Pp. 16–19. (rus)
8. *Popov N.N., Rastorguev B.S.* Dinamicheskii raschet zhelezobetonnykh konstruksii [Dynamic analysis of ferroconcrete elements]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974. 207 p. (rus)
9. *Popov N.N., Rastorguev B.S.* Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsial'nykh sooruzhenii [Design of specific constructions]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980. 189 p. (rus)
10. *Bazhenov Yu.M.* Beton pri dinamicheskom nagruzhenii [Concrete under dynamic load]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1970. 270 p. (rus)
11. *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*. 1985. Pp. 95-99. (rus)
12. *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)