УДК 620.172.212: 624.042.7

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ОБЪЕКТОВ

Корнеев А.М., Бузина О.П., Суханов А.В.

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, e-mail: pm03sav@mail.ru

В статье приводится описание программы для ЭВМ, используемой для оценки надежности фибробетонных балок, работающих на изгиб, с учетом физической нелинейности материалов. Программа создана с применением детерминированных и вероятностных алгоритмов на основе математической нелинейно-деформационной модели, позволяющей прогнозировать надежность изгибаемых элементов, представляющих собой неоднородные анизотропные объекты дисперсной структуры, армированные дискретными волокнами. Вероятностный расчет состоит в определении статистических характеристик прочности, жесткости и трещиностойкости исследуемых элементов конструкции при проведении большого количества статистических испытаний, связанных с моделированием исходных случайных величин. Для определения этих характеристик на каждом этапе разыгрываний проводится детерминированный расчет по нелинейно-деформационной модели, который положен в основу вероятностного алгоритма. Данные показатели позволяют судить об эксплуатационной пригодности исследуемых элементов конструкций.

Ключевые слова: модель напряженно-деформированного состояния, дискретное волокно, детерминированный алгоритм, вероятностный алгоритм, имитационное моделирование, анизотропный объект

SOFTWARE SIMULATION OF CHANGES STRESS-STRAIN STATE OF AN INHOMOGENEOUS ANISOTROPIC OBJECTS

Korneev A.M., Buzina O.P., Sukhanov A.V.

Federal State Educational Institution of Higher Education Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: pm03sav@mail.ru

The article describes a computer program that is used to assess the reliability of fiber concretes beams, flexural, taking into account physical nonlinearity of materials. The program was created with the use of deterministic and probabilistic algorithms based on mathematical nonlinear deformation model to predict the reliability of flexible elements which are inhomogeneous anisotropic structure of objects dispersed, discrete fiber-reinforced. Probabilistic calculation is to determine the statistical characteristics of strength, hardness and fracture toughness study design elements during a large number of statistical tests associated with modeling the original random variables. To determine these characteristics at each stage enactments performed a deterministic calculation of the nonlinear deformation model, which is the basis of a probabilistic algorithm. These figures allow us to judge about the serviceability of the study of structural elements.

Keywords: model of stress-strain state, discrete fibers, deterministic algorithm, a probabilistic algorithm, simulation, the anisotropic object

Появление новых материалов и композитов диктует развитие норм по проектированию конструкций, а также приводит к необходимости более широкого использования компьютерных технологий для оценки их надёжности и прогнозирования работы в условиях, приближённых к эксплуатационным [1–5], что способствует развитию методов имитационного моделирования. В настоящее время предложен ряд детерминированных и вероятностных алгоритмов на основе математической нелинейно-деформационной модели, позволяющей прогнозировать надежность изгибаемых элементов дисперсной структуры, армированных дискретными волокнами. Данные алгоритмы использованы при создании программы для ЭВМ по оценке надежности фибробетонных балок, работающих на изгиб, с учетом физической нелинейности материалов «SFRC.exe» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611439). Вероятностный расчет состоит в определении статистических характеристик прочности, жесткости и трещиностойкости исследуемых элементов конструкции при проведении большого количества статистических испытаний, связанных с моделированием исходных случайных величин. Для определения этих характеристик на каждом этапе разыгрываний проводится детерминированный расчет по нелинейно-деформационной модели, который положен в основу вероятностного алгоритма. Результатом работы программы являются показатели надежности изгибаемых элементов, армированных стальными дискретными волокнами, по прочности, жесткости и трещиностойкости. Данные показатели позволяют

судить об эксплуатационной пригодности исследуемых элементов конструкций. Блок-схемы алгоритмов программы представлены в работах [6, 7].

Для анализа основных статистических характеристик материалов использовался большой объем информации по обработке экспериментальных данных, полученных в лабораториях кафедр общей механики и строительных материалов ЛГТУ [6, 7].

Разработанный на основе детерминированной и вероятностной моделей программный комплекс «SFRC.exe» предназначен для анализа напряженно-деформированного состояния в нормальном сечении изгибаемого элемента и оценки надежности элементов, работающих на изгиб. Программа позволяет учитывать различные сочетания прочностных характеристик матрицы композита, объемного содержания дискретных волокон и их ориентации.

Структура программной среды на уровне информационного взаимодействия состоит из следующих основных модулей:

IZGIB – управляющий модуль, через который производится обращение к другим вспомогательным обеспечивающим модулям; необходим для вычисления изгибающего момента и прогибов балок прямоугольного сечения, лежащих на двух опорах.

К обеспечивающим модулям относятся:

1. Модуль DIAG – подпрограмма расчета диаграмм деформирования матрицы по заданным физико-механическим характеристикам. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента приведен в работе [7]. В работе [9] приведены основные аналитические зависимости для расчета напряжений в нормальном сечении элемента с волокнистой структурой (фибробетонов и сталефибробетонов). Данный модуль содержит подпрограммы, позволяющие рассчитывать напряженно-деформированное состояние элемента как в случае изотропной структуры (без дискретных волокон), так и в случае наличия анизотропной структуры (наличие ориентированных или дисперсно-распределенных по объему дискретных волокон, – стальной фибры).

2. Модуль FIBER – подпрограмма, генерирующая случайное распределение дискретных волокон в матрице композита. Основными входными параметрами для построения дисперсной структуры нормального сечения изгибаемого элемента являются геометрические характеристики сечения (высота, ширина) и объёмное содержание фибровой арматуры в объёме исследуемого образца. Модуль позволяет анализировать характер распределения волокон в нормальном сечении, а также их геометрические характеристики, – углы ориентации и заделку.

3. Модуль GEOM – подпрограмма построения геометрической структуры дисперсного элемента с дискретными волокнами по всему объему.

4. Модуль NAD – модуль расчета надежности элементов на основе вероятностной математической модели. Основные стохастические характеристики, необходимые для оценки надёжности исследуемого изгибаемого элемента, и алгоритм вероятностной модели приведён в работе [6].

5. Модуль DETERM – на основе детерминированной математической модели осуществляет расчет напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента на каждой стадии нагружения. Алгоритм расчета приведён в работе [5, 7].

6. Модуль MF – осуществляет расчет координат диаграммы «изгибающий момент – прогиб», выводит на экран результаты вычислений.

Структурная схема, отражающая связи между модулями программного комплекса в процессе анализа НДС изгибаемых элементов, представлена на рис. 1.

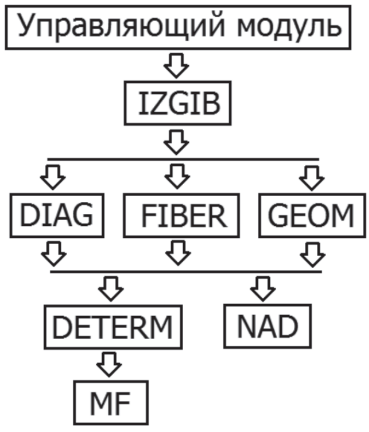


Рис. 1. Структурная схема алгоритма взаимодействия модулей программного комплекса «SFRC.exe»

Пользовательский интерфейс позволяет осуществить ввод следующих параметров:

– геометрические характеристики изгибаемого элемента (рис. 2);

– параметры дисперсного распределения дискретных волокон (рис. 3).

В отдельных окнах программы производится вывод результатов расчета напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента с использованием детерминированного алгоритма (рис. 4) и вероятностного алгоритма (рис. 5). Заметим, что

результатом расчета изгибаемого элемента по вероятностной модели является таблица с показателями надежности исследуемого образца с заданными геометрическими и физико-механическими характеристиками. Надежность образца оценивается по трем основным критериям: трещиностойкость (ширина раскрытия трещины в опасном нормальном сечении образца), жесткости (прогиб в центральном сечении) и прочности (максимальная нагрузка, при которой образец не разрушается).

На рис. 4 в окне программы также показано сравнение результатов натурных экспериментов со значениями численных экспериментов, полученных с помощью программы «SFRC.exe» для образцов-балок с объемным армированием μ_{fv} = 0, 0,5, 1,0 и 1,5 % [9].

Среднеквадратичное отклонение результатов (изгибающий момент) численного эксперимента от результатов натурного эксперимента составило:

– для образцов с объемным армированием μ_{fv} = 0 % –7,225 Нм;

– для образцов с объемным армированием μ_{fv} = 0,5 % – 11,475 Нм;

– для образцов с объемным армированием μ_{fv} = 1,0 % – 21,574 Нм;

– для образцов с объемным армированием μ_{fv} = 1,5 % – 26,007 Нм.

В таблице показаны результаты апробации программного комплекса, полученные при оценке надежности брусковых перемычек, изготовленных из бетонов на предприятии ОАО «Завод Железобетон» г. Липецка. Прогибы опытных балок от действия кратковременной нагрузки определяли двумя способами [10]:

– непосредственным замером при помощи индикаторов-прогибомеров;

– используя опытное значение кривизны в середине пролета балки по формуле

$$f = m\left(\frac{1}{r}\right)\cdot l^2 = m\left(\frac{\varepsilon_{br} - \varepsilon_{bc}}{h}\right)\cdot l^2, \qquad (1)$$

где m – коэффициент, зависящий от условий опирания и схемы загружения, принятый в данном случае 0,106; l = 900 мм – пролёт балки; h = 90 мм – высота сечения балки; ε_{br} и ε_{bc} – относительные деформации на уровне растянутой и сжатой грани сечения; $1/r$ – радиус кривизны балки.

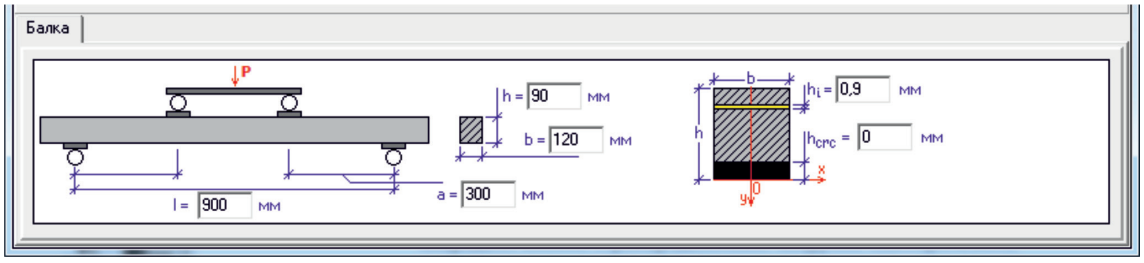


Рис. 2. Ввод геометрических характеристик изгибаемого элемента

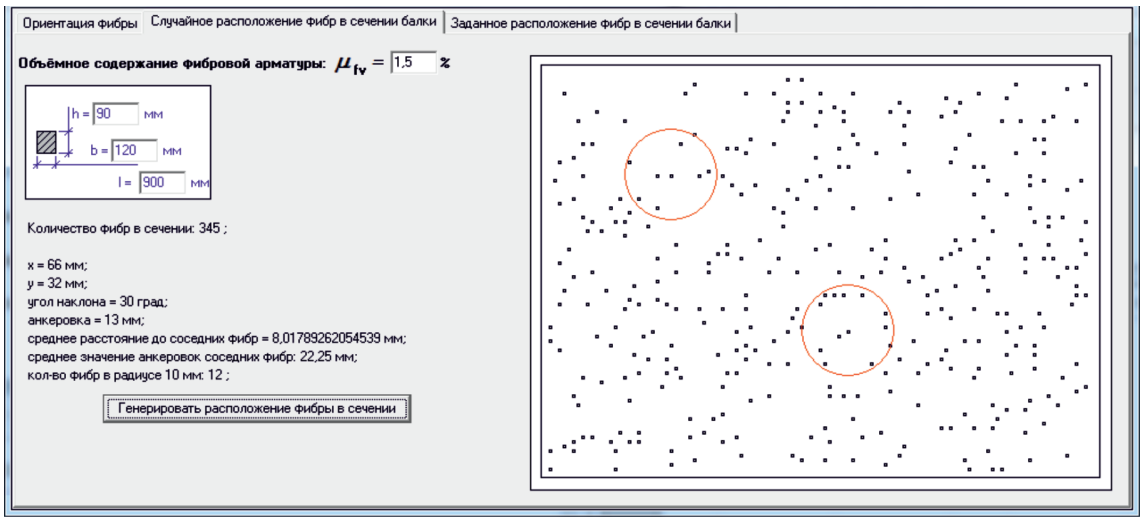


Рис. 3. Ввод и генерация параметров распределения дискретных волокон

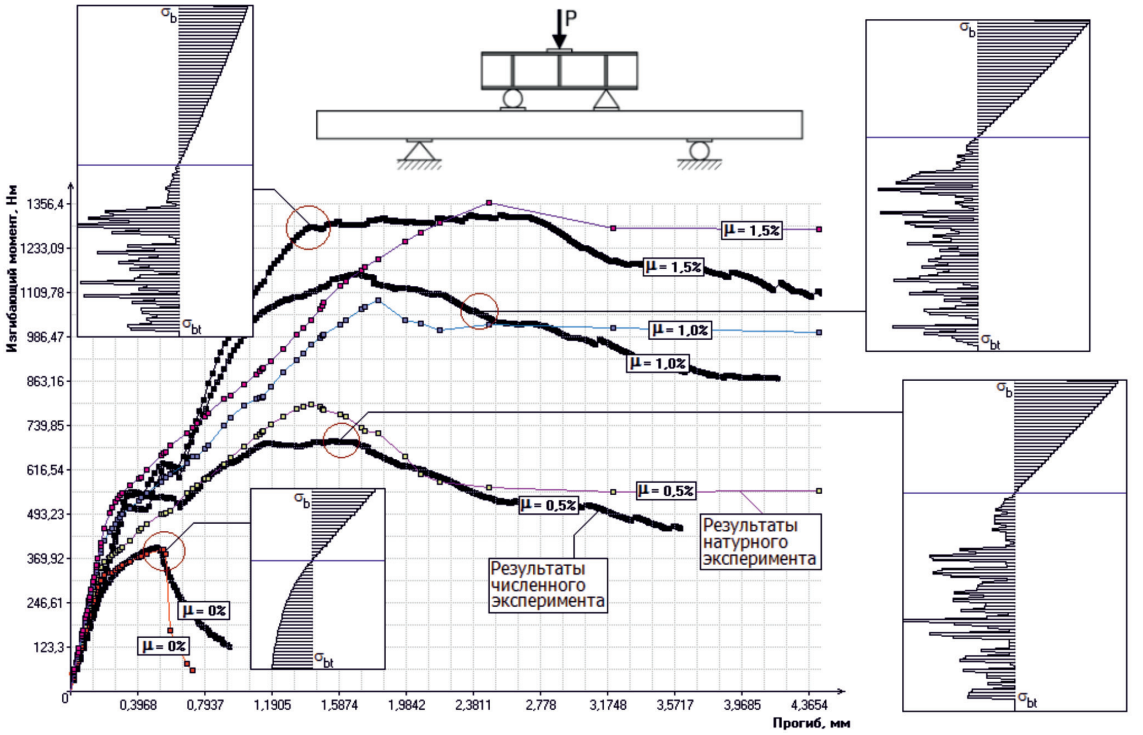
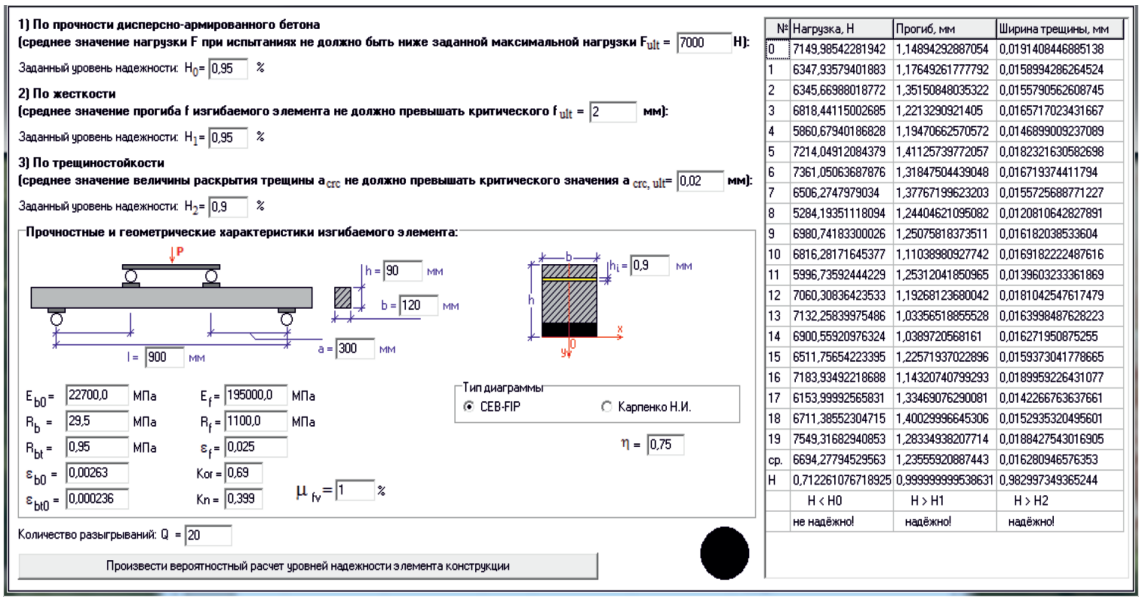


Рис. 4. Вывод результатов численного и натурного экспериментов для образцов-балок 120×90×1560 мм (детерминированный алгоритм)



№	Нагрузка, Н	Прогиб, мм	Ширина трещины, мм
0	7149,98542281942	1,14894292887054	0,0191408446885138
1	6347,93579401883	1,17649261777792	0,0158994286264524
2	6345,66988018772	1,35150848035322	0,0155790562608745
3	6818,44115002685	1,2213290921405	0,0165717023431667
4	5860,67940186828	1,19470662570572	0,0146899009237089
5	7214,04912084379	1,41125739772057	0,0182321630582698
6	7361,05063687876	1,31847504439048	0,016719374411794
7	6506,2747979034	1,37767199623203	0,0155725688771227
8	5284,19351118094	1,24404621095082	0,0120810642827891
9	6980,74183300026	1,25075818373511	0,0161820385336O4
10	6816,28171645377	1,11038980927742	0,0169182222487616
11	5996,73592444229	1,25312041850965	0,0139603233361869
12	7060,30836423533	1,19268123680042	0,0181042547617479
13	7132,25839975486	1,03356518855528	0,0163998487628223
14	6900,55920976324	1,0389720568161	0,016271950875255
15	6511,75654223395	1,22571937022896	0,0159373041778665
16	7183,93492218688	1,14320740799293	0,0189959226431077
17	6153,99992565831	1,33469076290081	0,0142266763637661
18	6711,38552304715	1,40029996645306	0,0152935320495601
19	7549,31682940853	1,28334938207714	0,0188427543016905
ср.	6694,27794529563	1,23555920887443	0,016280946576353
H	0,712261076718925	0,999999999538631	0,982997349365244
	H < H0	H > H1	H > H2
	не надёжно!	надёжно!	надёжно!

Рис. 5. Вывод показателей надежности и таблицы результатов, полученных с использованием вероятностного алгоритма

На основании данных численных и натурных экспериментов предложены рекомендации по применению имитационных математических моделей для оценки начальной надежности изгибаемых элементов дисперсной структуры с помощью созданного на основе описанных алгоритмов программного комплекса «SFRC.exe».

Результаты апробации программного комплекса

Марка образца	Требуемые уровни надежности			Требуемые критерии пригодности	Оценка надежности по вероятностной математической модели		
	H_0	H_1	H_2		H_0	H_1	H_2
БШ-1	0,95	0,95	0,9	F_{ult} = 7 кН, f_{ult} = 2 мм, $a_{crc,ult}$ = 0,02 мм	0,7 (не надежно)	0,99 (надежно)	0,98 (надежно)
БО-1	0,95	0,95	0,9		0,98 (надежно)	0,99 (надежно)	0,94 (надежно)
ФБО-1-0,5	0,93	0,95	0,9	F_{ult} = 7,5 кН, f_{ult} = 2,2 мм, $a_{crc,ult}$ = 0,02 мм	0,94 (надежно)	0,95 (надежно)	0,97 (надежно)
ФБО-1-1,0	0,93	0,92	0,8	F_{ult} = 8 кН, f_{ult} = 2,4 мм, $a_{crc,ult}$ =0,015мм	0,94 (надежно)	0,91 (не надежно)	0,73 (не надежно)
ФБО-1-1,5	0,9	0,90	0,8	F_{ult} = 9 кН, f_{ult} = 2,8 мм, $a_{crc,ult}$ = 0,01 мм	0,92 (надежно)	0,94 (надежно)	0,74 (не надежно)

Для применения программного комплекса «SFRC.exe» необходима информация о законах распределения и средних значениях (математических ожиданиях), среднеквадратических отклонениях или дисперсиях тех случайных величин, которые являются входными параметрами для исследования изгибаемого элемента с дискретными волокнами (бетона или фибробетона) в эксплуатационных условиях. Как правило, принято считать их распределение подчиненным нормальному закону, что подтверждается статистическим анализом большого массива технологических параметров [11]. Определение статистических параметров таких показателей производится по результатам генеральной совокупности с использованием интервальной оценки на базе накопленной априорной информации по всем необходимым показателям. Определение стохастических характеристик согласно стандарту ГОСТ 11.006-74, ГОСТ 21013-86 предусматривает проверку нормальности распределения исследуемой характеристики, расчет стационарных выборочных оценок для дисперсии и математического ожидания, проверку однородности дисперсии, а также определение по мере накопления информации характеристик априорного распределения. Ежесменная автоматизированная оценка эксплуатационной пригодности изгибаемых элементов конструкций с дискретными волокнами (бетонов или фибробетонов) реализуется посредством передачи программному комплексу характеристик необходимых для расчёта параметров, изменчивость которых может оказать значительное влияние на надежность исследуемой конструкции.

Список литературы

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона // Стройиздат. – М., 1996. – 419 с.

2. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Сб. научных трудов НИИЖБ «Напряжённо-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций». – М.: Стройиздат, 1986. – С. 7–25.

3. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.И. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1987. – С. 4–24.

4. Корнеев А.М. Математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния неоднородных сред с непрерывными и дискретными волокнами / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 8. – С. 39–44.

5. Корнеев А.М. Математическое моделирование процесса взаимовлияния стальных фибр в сечении изгибаемого элемента из сталефиброшлакобетона [Текст] / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов, И.А. Шипулин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4. – С. 506–511.

6. Корнеев А.М. Вероятностная математическая модель оценки начальной надежности изгибаемых элементов, дисперсно-армированных дискретными волокнами / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов, И.А. Шипулин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–3. – С. 489–494.

7. Корнеев А.М. Детерминированная математическая модель и алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с дискретными волокнами / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9–1. – С. 57–62.

8. Самарин Ю.А. Резервы надежности и долговечности железобетонных конструкций заводского изготовления / Ю.А. Самарин, Г.В. Коваленко, М.Т. Орлов. – М.: Информэнерго, 1988. – 44 с.

9. Черноусов Р.Н. Прочность и деформативность элементов конструкций транспортных сооружений на основе мелкозернистого сталефиброшлакобетона / Р.Н. Черноусов // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1(21). – С. 87–97.

10. Черноусов Н.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов // Бетон и железобетон. – 2010. – № 4. – С. 7–11.

11. Чирков В.П. Прикладные методы теории, надежности в расчетах строительных конструкций: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В.П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.