

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПОСОБИИ К СП 360.1325800.2017

STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DESIGNING IN THE MANUAL TO THE SP 360.1325800.2017

Б. С. СОКОЛОВ, канд. техн. наук
Т. А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук

Введен в действие Свод правил СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования», в котором даны общие правила расчета и конструирования сталефибробетонных конструкций. В связи с необходимостью сопровождения теоретических положений практическими примерами расчета эффективных видов конструкций из сталефибробетона потребовалась разработка методических материалов по расчету и проектированию сталефибробетонных конструкций. Пособие содержит необходимые теоретические и практические рекомендации, а также примеры расчета основных типов сталефибробетонных и комбинированно-армированных (со стержневой арматурой) конструкций зданий и сооружений различного назначения. Среди представленных примеров балочные и плитные конструкции различного сечения, внецентренно сжатые конструкции прямоугольного и кольцевого сечения, тонкостенные пространственные складчатые конструкции.

The Code of Rules SP 360.1325800.2017 "Steel-fiber concrete constructions. Design Rules", which gives general rules for the calculation and design of steel fiber concrete structures, enacted. In connection with the need to accompany theoretical provisions with practical examples of calculating effective types of structures made of steel fiber concrete, it was necessary to develop methodological materials (manual) for the calculation and design of steel fiber concrete structures. The manual contains the necessary theoretical and practical recommendations, as well as examples of the calculation of the main types of steel fiber reinforced concrete and combined-reinforced (with bar reinforcement) structures of buildings and structures for various purposes. Among the examples presented are beam and slab structures of various sections, eccentrically compressed structures of rectangular and annular sections, thin-walled spatial folded structures.

Ключевые слова:

Метод предельных усилий, нелинейная деформационная модель, прочность, сталефибробетон, трещиностойкость

Key words:

Crack resistance, critical stress method, nonlinear deformation model, steel fiber reinforced concrete, strength

Наблюдаемый в последние годы в отечественном строительстве рост объемов применения сталефибробетона не только в промышленных полах, дорожных покрытиях, ограждающих конструкциях и элементах декора, но и в несущих конструкциях зданий и инженерных сооружений отражает устойчивую тенденцию в мировой практике [10 - 12]. Сталефибробетон с успехом используется в мостостроении. Весьма эффективен этот материал в тонкостенных пространственных конструкциях [6 - 9].

Наличие соответствующего количества стальной фибры в сталефибробетоне улучшает ряд характеристик, важных для материала несущих конструкций: повышает трещиностойкость, ударную прочность, долговечность, снижает усадку и ползучесть и т.д., но в то же время вносит ряд особенностей в работу материала, что необходимо учитывать при проектировании конструкций из сталефибробетона без стержневой арматуры или комбинированно армированных – с рабочей (в том числе предварительно напряженной) и конструктивной стержневой арматурой.

В настоящее время введен в действие Свод правил СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования», в котором приведены общие правила расчета и конструирования сталефибробетонных конструкций. В развитие положений этого свода правил, который, в свою очередь, обеспечивает реализацию требований ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и СП 63.13330.2012 «СНиП 52–01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», коллективом специалистов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева разработано «Пособие по проектированию сталефибробетонных конструкций (к СП 360.1325800.2017)». Пособие содержит разъяснение особенностей методик расчета и правил конструирования сталефибробетонных конструкций зданий и сооружений, а также примеры расчета сталефибробетонных конструкций. В примерах рассмотрены пять видов конструкций с рациональным использованием сталефибробетона. Это монолитная плита днища многопролетного сборного железобетонного резервуара, колонна кольцевого поперечного сечения, а также освоенные производством сборные конструкции, в числе которых сборный элемент коммуникационного лотка, складчатая предварительно напряженная панель трапециевидного профиля для покрытий и сборная предварительно напряженная ребристая панель покрытия. Все рассмотренные сталефибробетонные конструкции, за исключением коммуникационного лотка, имеют комбинированное армирование с использованием стержневой или проволочной арматуры.

Структура Пособия в целом соответствует структуре СП 360.1325800 [1].

Раздел «Общие требования» устанавливает рекомендуемые области применения сталефибробетонных конструкций без стержневой арматуры и со стержневой арматурой; порядок указания требований к сталефибробетону в проектной документации; требования к выполнению расчетов сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп для различных расчетных ситуаций, включая стадии изготовления,

транспортирования, возведения, эксплуатации, а также аварийные ситуации.

В разделе «Материалы» в соответствии с установленной сводом правил классификацией сталефибробетона приведены основные нормируемые показатели качества сталефибробетона:

- класс по прочности на сжатие B_p , соответствующий значению кубиковой прочности сталефибробетона на сжатие, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная кубиковая прочность);

- класс по прочности на осевое растяжение B_{ft} , соответствующий значению прочности сталефибробетона на осевое растяжение, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная прочность сталефибробетона);

- класс по остаточной прочности на растяжение B_{f13} , соответствующий значению остаточной прочности сталефибробетона на растяжение, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная прочность сталефибробетона).

Еще одной прочностной характеристикой, определяющей форму нисходящей ветви диаграммы состояния сталефибробетона при растяжении, является остаточное сопротивление сталефибробетона осевому растяжению R_{fb2} . Отношением $R_{fb13,n} / R_{fb12,n} = 0,5, 0,7, 0,9, 1,1$ и $1,3$ определяются подклассы сталефибробетона соответственно a, b, c, d и e .

Классы сталефибробетона по остаточной прочности на осевое растяжение и соответствующие им нормативные и расчетные значения сопротивления сталефибробетона осевому растяжению в Пособии представлены в табличной форме.

В качестве рабочих диаграмм деформирования сталефибробетона при осевом сжатии допускается принимать диаграммы как для обычного бетона по СП 63.13330 [2] (в том числе упрощенную трехлинейную), а сжимающие напряжения сталефибробетона σ_{fb} в зависимости от относительных деформаций укорочения сталефибробетона ε_{fb} определять по формулам, указанным в СП 63.13330 [2] для обычного бетона. В качестве рабочих диаграмм деформирования сталефибробетона при осевом растяжении принята упрощенная четырехлинейная диаграмма. В Пособии приведены формулы для определения растягивающих напряжений сталефибробетона σ_{fbt} в зависимости от относительных деформаций удлинения сталефибробетона ε_{fbt} на каждом из четырех линейных участков.

В главе «Сталефибробетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» представлены принципиальные положения и методика расчета элементов сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп, изложенные в двух соответствующих разделах этой главы. Теоретические основы расчетов сталефибробетонных конструкций изложены в Своде правил [1], а также в ряде публикаций [3 - 5].

Расчет по прочности элементов сталефибробетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил (внецентренное сжатие или растяжение) следует производить для сечений, нормальных к их продольной оси.

Расчет по прочности нормальных сечений элементов следует производить на основе нелинейной деформационной модели.

Расчет по прочности нормальных сечений элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений без рабочей арматуры или с арматурой, расположенной у верхней и нижней гранях сечения, допускается производить по предельным усилиям.

Расчет по прочности нормальных сечений элементов по предельным усилиям следует

производить, определяя предельные усилия, которые могут быть восприняты фибробетоном и арматурой в нормальном сечении, исходя из следующих положений:

- сопротивление сталефибробетона растяжению представляется напряжениями, равными R_{fbt3} и равномерно распределенными по растянутой зоне сталефибробетона;
- сопротивление сталефибробетона сжатию представляется напряжениями, равными R_{fb} и равномерно распределенными по сжатой зоне сталефибробетона (рис. 1);
- деформации (напряжения) в арматуре определяют в зависимости от высоты сжатой зоны сталефибробетона;
- растягивающие напряжения в стержневой арматуре принимают не более расчетного сопротивления растяжению R_s ;
- сжимающие напряжения в стержневой арматуре принимают не более расчетного сопротивления сжатию R_{sc} .

При расчете по прочности нормальных сечений элементов по предельным усилиям принимают $R_{fbt3} \leq R_{fbt2}$.

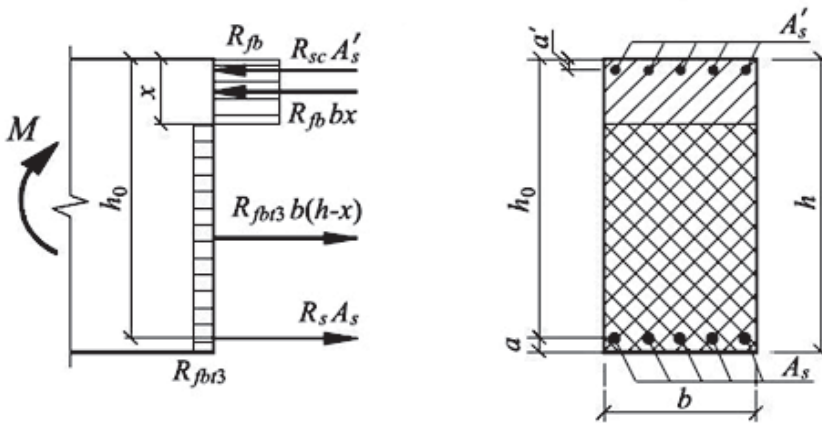


Рис.1. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси, при расчете по прочности изгибаемого сталефибробетонного элемента прямоугольного сечения с арматурой

Расчет по прочности нормальных сечений элементов без рабочей арматуры по предельным усилиям надлежит производить, исходя из следующих положений:

- эпюру напряжений в сжатой зоне сталефибробетона принимают треугольной формы, как для упругого тела (рис. 2);
- эпюру напряжений в растянутой зоне сталефибробетона принимают трапецевидной формы с напряжениями в растянутой грани сечения, равными R_{fb} ;
- относительную деформацию крайнего растянутого волокна бетона принимают равной ε_{fbt1} .

Расчет изгибаемых элементов по прочности иллюстрируется Примером № 1, в котором рассмотрен расчет сталефибробетонной плоской плиты днища резервуара.

Расчет внецентренно сжатых элементов по прочности рассмотрен в Примере № 2, где приведен расчет сталефибробетонного лотка для коммуникационных каналов, а также в Примере № 3 расчета колонны кольцевого сечения.

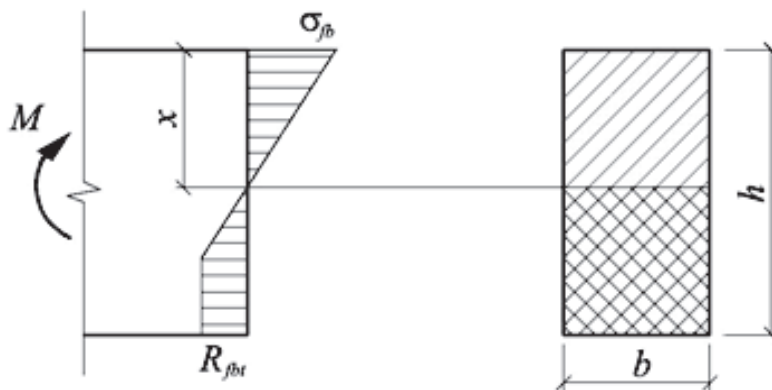


Рис.2. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси, при расчете по прочности изгибаемого сталефибробетонного элемента прямоугольного сечения без арматуры

В Пособии приведены основные положения расчета по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели, использующей уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в сечении элемента, а также следующих положений:

- распределение относительных деформаций сталефибробетона и арматуры по высоте сечения элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);
- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями сталефибробетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) сталефибробетона и арматуры.

Переход от эпюры напряжений в сталефибробетоне к обобщенным внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению, условно разбитому на малые участки, напряжения в пределах которых принимают усредненными равномерно распределенными.

Расчет по прочности элементов при действии поперечных сил следует производить по наклонному сечению на действие поперечной силы, по наклонному сечению на действие изгибающего момента и по бетонной полосе между наклонными сечениями на действие поперечной силы аналогично соответствующим методикам СП 63.13330 [2] с использованием соответствующих прочностных характеристик сталефибробетона.

В Пособии приведен пример расчета сталефибробетонного лотка с исходными данными, рассмотренными в Примере № 2, при действии поперечной силы (Пример № 4).

Расчеты сталефибробетонных элементов на местное сжатие (смятие) и на продавливание выполняются по методикам, аналогичным принятым в СП 63.13330 [2].

Расчеты элементов сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям второй группы включают расчет по образованию трещин, расчет по раскрытию трещин и расчет по деформациям.

При расчете по образованию трещин в целях их недопущения коэффициент надежности по нагрузке принимают $\gamma_f > 1,0$ (как при расчете по прочности). При расчете по раскрытию трещин и по деформациям (включая вспомогательный расчет по образованию трещин) принимают коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,0$.

Предполагается, что наличие трещин в сталефибробетонных конструкциях без стержневой арматуры не допускается, и расчет по раскрытию трещин выполняется только для комбинированно-армированных конструкций, при этом предельная ширина раскрытия трещин устанавливается в пределах 0,1 – 0,3 мм исходя из эстетических соображений, наличия требований к проницаемости конструкций, а также в зависимости от длительности действия нагрузки, вида арматурной стали и ее склонности к развитию коррозии в трещине.

Момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого сталефибробетона определяют в соответствии со следующими положениями:

- сечения после деформирования остаются плоскими;
- эпюру напряжений в сжатой зоне сталефибробетона принимают треугольной формы как для упругого тела (рис. 3);
- эпюру напряжений в растянутой зоне сталефибробетона принимают трапецевидной формы с напряжениями, не превышающими расчетных значений сопротивления сталефибробетона растяжению $R_{fbt,ser}$;
- относительную деформацию крайнего растянутого волокна сталефибробетона принимают равной ε_{fbt1} ;
- напряжения в арматуре принимают в зависимости от относительных деформаций как для упругого тела.

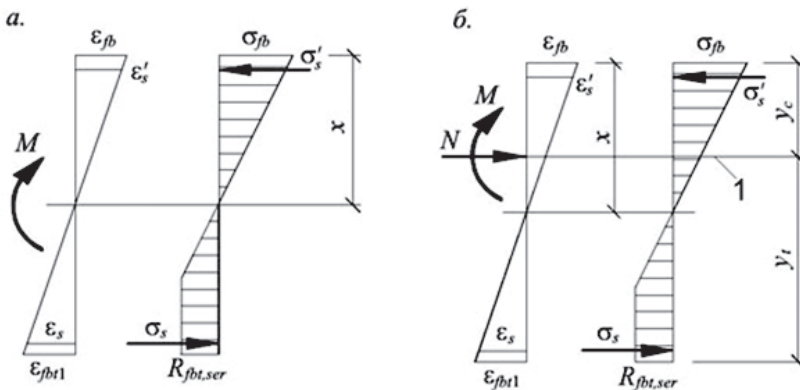


Рис.3. Схема напряженно-деформированного состояния сечения элемента при проверке образования трещин:
а — при действии изгибающего момента; б — при действии изгибающего момента и продольной силы;
1 – уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

Расчет сталефибробетонного элемента по образованию нормальных трещин иллюстрируется Примером № 6 для лотка для коммуникационных каналов с исходными данными Примера № 2.

Расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента при действии изгибающего момента и при совместном действии изгибающего момента и продольной силы выполняются в соответствии со следующими положениями:

- сечения после деформирования остаются плоскими;
- эпюру напряжений в сжатой зоне сталефибробетона принимают треугольной формы как для упругого тела (рис. 4);

- эпюру напряжений в растянутой зоне сталефибробетона принимают прямоугольной формы с напряжениями, равными расчетным значениям остаточного сопротивления сталефибробетона растяжению $R_{fbt2,ser}$;
- относительную деформацию крайнего растянутого волокна сталефибробетона принимают равной ε_{fbt2} ;
- напряжения в арматуре принимают в зависимости от относительных деформаций как для упругого тела.

Ширина раскрытия нормальных трещин зависит от величины напряжения в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от внешней нагрузки, длительности действия нагрузки, характера нагружения (растяжение, изгиб, внецентренное сжатие), степени неравномерности распределения относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами и расчетного базового расстояния между трещинами, которое, в свою очередь, зависит от диаметра и от вида профиля стержневой арматуры, коэффициента фибрового армирования по объему, соотношения длины и толщины фибры и характера нагружения.

Расчет по образованию и раскрытию нормальных трещин демонстрируется в Примере № 7 для сталефибробетонной плоской плиты дна резервуара с исходными данными, приведенными в Примере № 1.

Расчет элементов сталефибробетонных конструкций по деформациям производят с учетом эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкциям, на действие:

- постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок при ограничении деформаций технологическими или конструктивными требованиями;
- постоянных и временных длительных нагрузок при ограничении деформаций эстетическими требованиями.

Прогибы сталефибробетонных конструкций определяют по общим правилам строительной механики в зависимости от изгибных, сдвиговых и осевых деформационных характеристик сталефибробетонного элемента в сечениях по его длине (кривизн, углов сдвига и т. д.).

Кривизну изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов для вычисления их прогибов определяют в зависимости от наличия на данном участке элемента трещин в растянутой зоне.

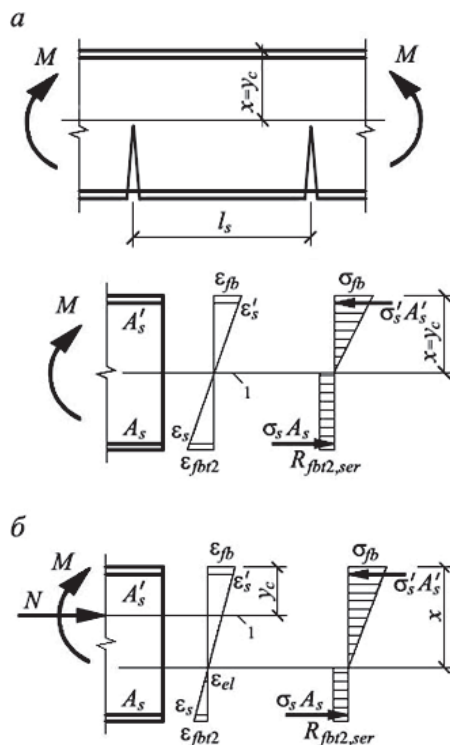


Рис.4. Схема напряженно-деформированного состояния элемента с трещинами: а – при действии изгибающего момента; б – при действии изгибающего момента и продольной силы; 1 – уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

Жесткость сталефибробетонного элемента на участке без трещин определяют как для сплошного тела по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом приведения арматуры к сталефибробетону.

Жесткость сталефибробетонного элемента на участках с трещинами в растянутой зоне определяют с учетом следующих положений:

- сечения после деформирования остаются плоскими (рис. 5);
- напряжения в сталефибробетоне сжатой зоны определяют как для упругого тела;
- напряжения в сталефибробетоне растянутой зоны в сечении с нормальной трещиной определяют с учетом нелинейных свойств;
- работу растянутого сталефибробетона на участке между смежными нормальными трещинами учитывают посредством коэффициента ψ_s .

В Пособии приведены основные положения методики определения кривизны стале-

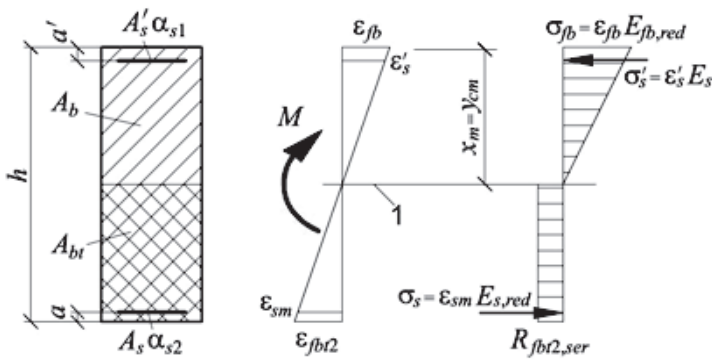


Рис.5. Приведенное поперечное сечение и схема напряженно-деформированного состояния элемента с трещинами для расчета его по деформациям при действии изгибающего момента:
1 – уровень центра тяжести поперечного сечения

фибробетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели, аналогичные установленным в СП 63.13330 [2], при этом особенности работы сталефибробетона в сжатой и растянутой зонах сечения учитываются диаграммами его деформирования, принимаемыми с учетом длительности деформирования.

Аналогичный описанному комплекс расчетов по двум группам предельных состояний представлен в Пособии в разделе для предварительно напряженных сталефибробетонных конструкций. Этот раздел также иллюстрируется рядом примеров.

В Примере № 8 представлена проверка прочности нормальных сечений предварительно напряженной сталефибробетонной складчатой панели длиной 6 м на пролет 5,2 м, шириной 1,2 м и толщиной 20 мм. В Примере № 9 представлена проверка прочности наклонных сечений при действии поперечной силы для той же складчатой панели.

В Примере № 10 выполнена проверка прочности нормальных сечений предварительно напряженной сталефибробетонной ребристой плиты покрытия пролетом 5,8 м и шириной 3 м. Для той же ребристой плиты в Примере № 11 представлена проверка прочности наклонных сечений при действии поперечной силы.

В Примере № 12 приведен расчет по образованию нормальных трещин для предварительно напряженной сталефибробетонной складчатой панели из Примера № 8.

Расчет по образованию и раскрытию нормальных трещин при действии изгибающего момента представлен в Примере № 13 для предварительно напряженной сталефибробетонной ребристой плиты покрытия из Примера № 10.

В Примере № 14 выполнено определение прогиба предварительно напряженной сталефибробетонной складчатой панели с исходными данными, приведенными в Примерах № 8 и № 12. Также определение прогиба представлено в Примере № 15 для предварительно напряженной сталефибробетонной ребристой плиты покрытия с исходными данными, приведенными в Примерах № 10 и № 13.

В разделе «Конструктивные требования» представлены требования к геометрическим размерам сечений, требования по минимальным коэффициентам дисперсного и дискретного армирования сталефибробетонных элементов, по минимальным размерам толщин защитных слоев сталефибробетонных конструкций, приведена методика определения базовой длины анкеровки стержневой арматуры в сталефибробетоне, даны рекомендации по назначению гранулометрического состава бетонной смеси и по выбору параметров стальной фибры.

Библиографический список

1. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования.
2. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
3. *Мухамедиев Т.А., Соколов Б.С.* Новое в нормировании сталефибробетона и расчетах сталефибробетонных конструкций // *Строительные материалы*, 2017. — № 4. — С. 59-64.
4. *Мухамедиев Т.А.* К вопросу расчета фибробетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*, 2017. — № 1. — С. 16-20.
5. *Мухамедиев Т.А.* Расчет по прочности изгибаемых фибробетонных конструкций методом предельных усилий — *Строительная механика и расчет сооружений*, № 2016. — № 5. — С. 12-18.
6. *Волков И.В., Беляева В.А.* Сталефибробетонные конструкции зданий и сооружений. — М.: ВНИИТПИ, 1990.
7. *Рабинович Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. — М.: АСВ, 2011.
8. *Шугаев В.В., Соколов Б.С., Гагуа Н.И.* [и др.] Пространственные конструкции из гнущемоформованных дисперсно-армированных элементов. / Сб.: Пространственные конструкции. Материалы семинара МДНТП. М.: МДНТП, 1991. — С.192-200.
9. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987.
10. ACI 544.1R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Committee 544, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
11. RILEM, Final recommendations of TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ - ϵ design method. // *Materials and Structures*. — Vol. 36. — 2003. — Pp. 560-565.
12. Concrete Society. Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete. Technical Report No. 63. The Concrete Society, Camberley – Cromwell Press, Trowbridge, UK, 2007.

Авторы:

Борис Сергеевич СОКОЛОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Boris SOKOLOV, Ph.D. (Engineering), Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-74-80

Тахир Абдурахманович МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство», Москва

Takhir MUKHAMEDIEV, D. Sci (Engineering), chief researcher, Laboratory of corrosion and durability of concrete and reinforced concrete structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: takhir50@rambler.ru
тел.: +7 (499) 174-76-95