

Расчет прогонов с учетом недопущения прогрессирующего обрушения шатра покрытия здания со стальным каркасом



**Есипов
Андрей
Владимирович**

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Строительные конструк-
ции» ФГБОУ ВО
«Тюменский
индустриальный
университет»

e-mail:
sibstroy.2012@yandex.ru



**Алексеева
Александра
Алексеевна**

магистрант кафедры
«Строительные конструк-
ции» ФГБОУ ВО
Тюменский
индустриальный
университет»

e-mail: alesoteric@mail.ru

В статье приведены результаты статических и конструктивных расчетов прогонов шатра покрытия здания со стальным каркасом при нормальных условиях эксплуатации и при учете недопущения прогрессирующего обрушения. В статических и конструктивных расчетах учтено изменение расчетной схемы прогонов при отказе одной из стропильных ферм покрытия. Помимо этого, рассмотрены и проанализированы варианты конструирования узлов опирания прогонов на стропильные фермы на обычных и высокопрочных болтах, а также на монтажной сварке.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, аварийное воздействие, прогоны, узел опирания, прочность.

ESIPOV A. V., ALEKSEEVA A. A.

ESTIMATION OF BEAM AS A RESULT OF THE PROGRESSING COLLAPSE OF THE COVERING OF BUILDINGS WITH THE STEEL FRAMEWORK

This article presents the results of static and constructive calculations of beam of a tent of a covering of the building with a steel framework as a result of the action of design loads and with the progressive collapse. In static and constructive calculations considers change of the scheme of a beam at refusal of one of rafter farms of a covering is considered. Options of designing of knots of connection of beams on rafter farms on usual and high-strength bolts, and also on assembly welding are considered and analyzed.

Keywords: the progressive collapse, emergency influence, girders, connecting knot, strength.

Обеспечение надежности несущих конструкций объектов гражданского строительства является основной задачей инженеров-проектировщиков, а минимизация рисков аварий зданий и сооружений является общественным приоритетом. В этой связи обеспечение безопасности зданий приводит к необходимости учета требований прогрессирующего обрушения несущих конструкций, которое характеризуется возникновением цепной реакции разрушения в результате локального повреждения отдельных конструктивных элементов каркаса [1–3].

Как правило, прогоны покрытия не участвуют в обеспечении общей устойчивости каркасных зданий, не воспринимают ветровые нагрузки и не обеспечивают устойчивость строительных конструкций (ферм или балок), а выполняют вспомогательную функцию — восприятие нагрузок от кровли и передачи реакций на нижележащие строительные конструкции.

В случае возникновения аварийных ситуаций или выхода из строя одной из строительных конструкций (фермы или балки) фрагменты последней и часть кровли могут обрушиться, становясь источником опасности для жизни и здоровья людей [4, 5]. В связи с этим рассмотрим восприятие прогонами нагрузок от кровли и разрушенной строительной конструкции и передачу реакций на соседние конструкции, позволяя избежать прогрессирующего обрушения шатра покрытия здания.

Рассмотрим элементарную задачу прогрессирующего обрушения прогона покрытия здания со стальным каркасом.

В качестве исходных данных для расчета прогонов принято следующее:

- значение снеговой нагрузки принято для III снегового района — 150 кг/м² (Приложение Е.1 [6]);
- прогон — швеллер по ГОСТ 8240–97;
- марка стали для прогонов С245 (Приложение В.1 [7]);

Таблица 1. Основные характеристики и система коэффициентов

Основные характеристики	Нормальные условия эксплуатации	Учет прогрессирующего обрушения
Сопротивление проката	Расчетное сопротивление $R_y = 2400 \text{ кг/см}^2$	Нормативное сопротивление $R_{yn} = 2450 \text{ кг/см}^2$
Коэффициент надежности по назначению, γ_n	1	1
Коэффициент условий работы конструкций, γ_c	1	1,1
Коэффициент надежности по материалу, γ_m	1,05	1
Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f	1,2 (постоянные)	1
	1,4 (временные)	0,5

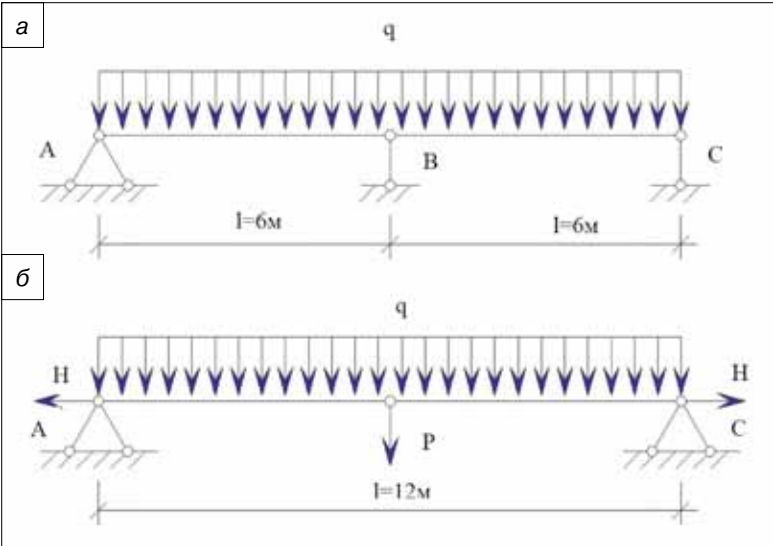


Иллюстрация 1. Расчетные схемы прогона: а — при нормальных условиях эксплуатации; б — с учетом прогрессирующего обрушения

Таблица 2. Постоянные и временные нагрузки на прогоны шатра покрытия

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка кг/м ²
Постоянные нагрузки		
1	ПВХ мембрана, $t = 1,5 \text{ мм}$	1,6
2	Утеплитель — минераловатная плита, $t = 150 \text{ мм}$, $\gamma = 150 \text{ кг/м}^3$	22,5
3	Профнастил Н75-750-0,8	10
	Итого	33,75
$q^{пост} = q \cdot b \cdot \gamma_n = 33,75 \text{ кг/м}^2 \cdot 3 \text{ м} \cdot 1 = 101,25 \text{ кг/м}$		
Временные нагрузки		
1	Снеговая нагрузка	150
$q^{сн\epsilon\epsilon} = S_o \cdot b \cdot \gamma_n = 150 \text{ кг/м}^2 \cdot 3 \text{ м} \cdot 1 = 450 \text{ кг/м}$		
2	Аварийная нагрузка от веса фермы	720
$P = q^{фер} \cdot b \cdot l \cdot \gamma_n = 40 \text{ кг/м}^3 \cdot 3 \text{ м} \cdot 6 \text{ м} \cdot 1 = 720 \text{ кг}$		
q — нормативная постоянная нагрузка, кг/м ² ; S_o — нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия, кг/м ² ; γ_n — коэффициент надежности по назначению.		

• шаг прогонов 3 м;

• расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов для расчета на прогрессирующее обрушение принимаются равными их нормативным значениям согласно [8].

Все расчеты были выполнены в лицензированном программном комплексе STARK ES, предназначенном для численного моделирования и основанном на методе конечных элементов. Особенностью расчета на прогрессирующее обрушение является применение принципиально другой системы коэффициентов в сравнении с расчетом на проектные нагрузки и воздействия. Обусловлено это тем, что данные коэффициенты учитывают малую вероятность возникновения аварийного воздействия. Основные характеристики и система коэффициентов представлены в Таблице 1 и приняты согласно [6–9].

Существующие методы расчета строительных конструкций по предотвращению прогрессирующего обрушения разделяются на две основные группы: прямой и косвенный. При статическом расчете учитывается прямой метод. Данный метод предусматривает прямое рассмотрение сопротивления прогрессирующему обрушению при проектировании [8, 10].

Моделирование прогрессирующего обрушения в задаче осуществляется путем удаления опоры, как результат обрушения одной из несущих стропильных ферм, рассмотрение снеговой нагрузки — как особой и аварийной сосредоточенной нагрузки от веса вышедшей из строя стропильной фермы [11–13].

Расчетные схемы прогонов:

- при нормальных условиях эксплуатации — разрезной прогон пролетом 6 м (Иллюстрация 1, а);
- при моделировании прогрессирующего обрушения — балка с шарниром в центре на двух шарнирно-неподвижных опорах (так как плоские системы обладают нулевой живучестью, необходимо обеспечить восприятие распора через горизонтальные связи шатра покрытия) (Иллюстрация 1, б).

В зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать постоянные и временные нагрузки [6] (Таблица 2).

Расчет на прогрессирующее обрушение осуществляется только для первой группы предельных состояний. Расчет сооружений на устойчивость против прогрессирующего обрушения следует выполнять на особое сочетания

Таблица 3. Параметры напряженно-деформированного состояния прогонов

Параметры сравнения	Нормальные условия эксплуатации	Учет прогрессирующего обрушения
Изгибающий момент, кН · м	35	11
Поперечная сила, кН	23	11
Продольная сила, кН	—	329
Прогиб, мм	21	193*
Максимально допустимые перемещения [2]	30 (пролет 6 м)	48 (пролет 12 м)
Учет геометрической нелинейности	Нет	Да
Коэффициент использования (отношение действующих напряжений к расчетному сопротивлению проката)	0,9	0,64
По результатам расчета:		
№ швеллера	24П	24П

* Прогибы для рассматриваемой аварийной ситуации не ограничиваются.

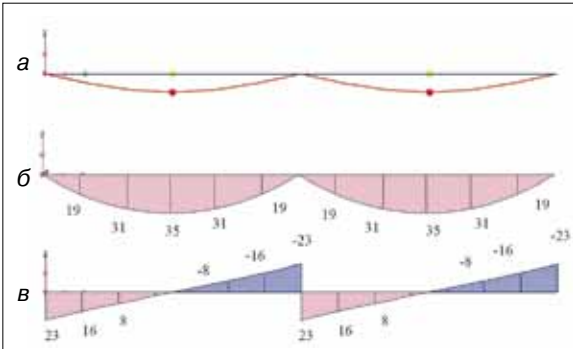


Иллюстрация 2. Графические результаты расчета прогона на проектные нагрузки: а — деформативная схема ($f = 21$ мм); б — эпюра изгибающих моментов, кН · м; в — эпюра поперечных сил, кН

ние, с учетом изменения расчетной схемы, вызванное гипотетическим локальным разрушением. Для особых сочетаний нагрузок (снеговая и аварийная нагрузки) коэффициент сочетания принимается $\psi_s = 0,8$ [6].

При изменении расчетной схемы прогонов с превращением его в «цепь» в расчете требуется учет геометрической нелинейности прогона, работающего на растяжение с изгибом.

Эпюры внутренних усилий и деформативные схемы представлены на Иллюстрациях 2, 3.

Результаты статических расчетов прогонов на нормальные условия эксплуатации и при учете недопущения прогрессирующего обрушения шатра покрытия представлены в Таблице 3.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что при учете недопущения прогрессирующего обрушения и изменении расчетной схемы прогонов происходит уменьшение изгибающего момента и появление продольной силы. Одновременно с этим значительно возрастают прогибы.

Как видно на Иллюстрации 4, прогон при изменении расчетной схемы и отказе стропильной фермы покрытия работает как растянуто-изгибаемый элемент. Нормальные напряжения в поперечном сечении прогонов от растягивающей силы превалируют над напряжениями изгиба и, в целом, не превышают сопротивления проката.

Таким образом, несущей способностью прогона, рассчитанного изначально на проектные нагрузки, достаточно для восприятия непроектных воздействий, вызванных обрушением строительной конструкции.

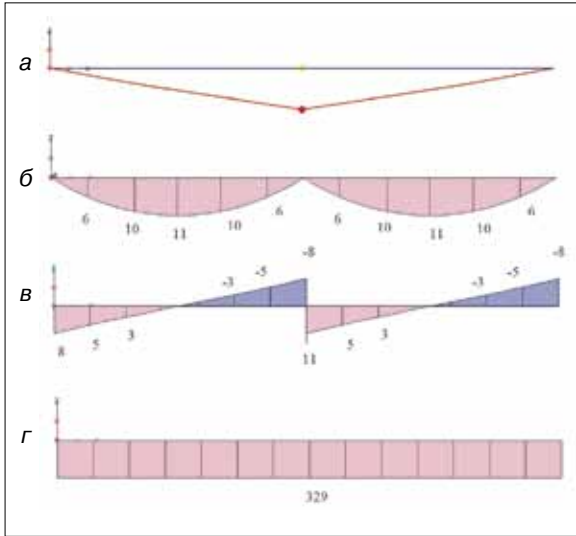


Иллюстрация 3. Графические результаты расчета прогона на прогрессирующее обрушение: а — деформативная схема ($f = 193$ мм); б — эпюра изгибающих моментов, кН · м; в — эпюра поперечных сил, кН; г — эпюра продольных сил, кН

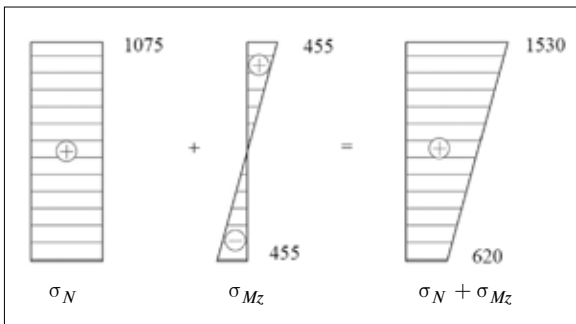


Иллюстрация 4. Нормальные напряжения в поперечном сечении прогонов, кг/см²

Одновременно с этим изменение опорных реакций и появление значительного усилия распора приводит к необходимости пересмотра конструирования узлов опирания прогонов на строительные конструкции.

Рассмотрим варианты конструирования узлов опирания прогонов на фермы на обычных болтах М20 класса точности В, на высокопрочных болтах 40Х (Иллюстра-

Таблица 4. Сравнение результатов расчета узлов опирания прогонов

№ п/п	Вид узла	Условное обозначение	Результаты расчета	
			Нормальные условия эксплуатации	Учет прогрессирующего обрушения
1	На обычных болтах М20: — класс прочности 5.6 — класс прочности 10.9		1 шт.	10 шт.
			1 шт.	3 шт.
2	На высокопрочных болтах 40Х		1 шт.	5 шт.
3	Сварка (электрод Э42)		5 см	57 см

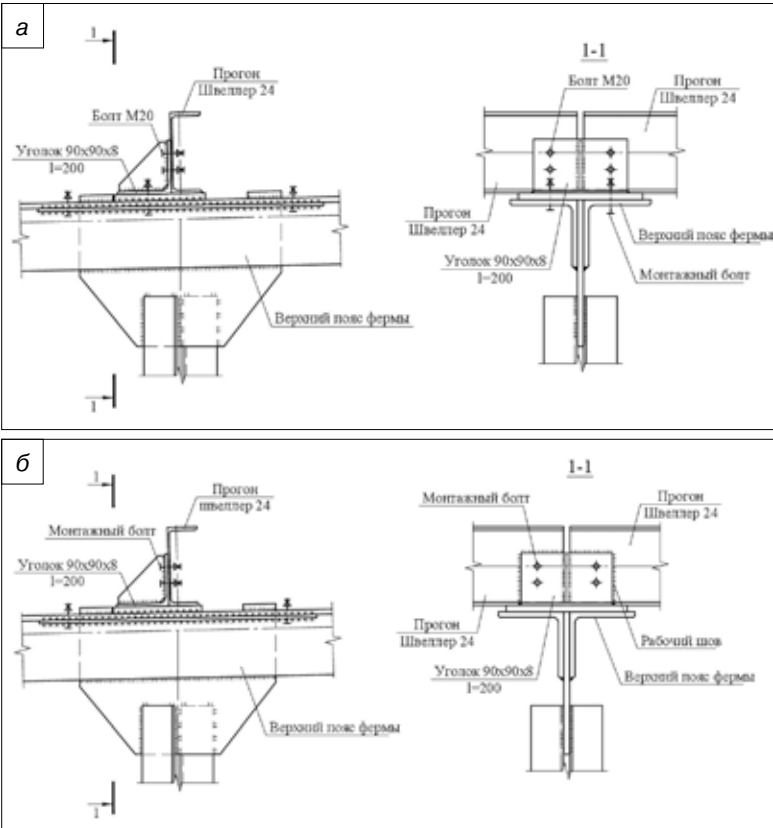


Иллюстрация 5. Варианты конструирования узлов опирания прогонов на фермы: а — соединение на обычных и высокопрочных болтах; б — соединение на монтажной сварке

ция 5, а) и на ручной электродуговой сварке электродом Э42 (Иллюстрация 5, б).

Узел опирания прогонов на верхний пояс фермы имеет шпальный распределитель, который работает как жестко закрепленная балка. Шпальный распределитель находится в сложном напряженно-деформированном состоянии.

В данной задаче моделируется прогрессирующее обрушение, поэтому при расчете по прочности шпального распределителя необходимо учитывать возникновение распора и увеличение опорной реакции от аварийного воздействия. В резуль-

тате расчет проводится на действие результирующей силы. По результатам расчета был подобран уголок $90 \times 90 \times 8$ мм длиной 200 мм.

При сравнении результатов расчетов узлов опирания прогонов на стропильные фермы с учетом недопущения прогрессирующего обрушения (Таблица 4) оказывается наиболее рациональным применение высокопрочных болтов. Так, при проектных нагрузках узел будет работать как сдвигоустойчивое соединение, а при возникновении прогрессирующего обрушения — как на обычных болтах, что позволит узлу быть податливым при аварийных воздействиях.

Заключение

В заключение можно сказать, что проектирование и конструирование прогонов с учетом недопущения прогрессирующего обрушения шатра покрытия здания является технически выполнимой задачей. По результатам расчетов видно, что выбранное сечение прогонов удовлетворяет условию прочности и не приводит к перерасходу материала. С другой стороны, значительно увеличивается количество болтов или длины сварных швов в узлах опирания прогонов на стропильные фермы вследствие изменения расчетной схемы прогонов и появления усилия распора.

Если говорить в целом о проектировании шатра покрытия здания с учетом недопущения прогрессирующего обрушения, то увеличение материалоемкости является ожидаемым эффектом, но в целях обеспечения необходимой безопасности жизни и здоровья граждан данные проектные решения являются оправданными [14, 15].

Задачами дальнейших исследований являются расчет каркаса здания в пространственной постановке с учетом недопущения прогрессирующего обрушения, при наличии системы вертикальных и горизонтальных связей, перераспределяющих усилия в каркасе вследствие отказа отдельных ключевых элементов, а также анализ особенностей конструирования узлов крепления связей и прогонов, воспринимающих дополнительные усилия вследствие изменения расчетной схемы сооружения при учете недопущения прогрессирующего обрушения.

Список использованной литературы

1 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: ГОСТ 27751–2014. — Введ. 2014-11-12. — М.: Стандартинформ, 2015. — 14 с.: ил.

- 2 Здания и сооружения. Особые воздействия: СП 296.1325800.2017. — Введ. 2017-03-08. — М.: Стандартинформ, 2017. — 23 с.: ил.
- 3 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse: UFC 4-023-03. — 2009-14-07. — USA: Department of Defense, 2005. — 245 p.
- 4 Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. — USA, DC, Washington: United States General Services Administration, 2003. — 119 p.
- 5 Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01–85). — Введ. 1986-31-07. — М.: Стройиздат, 1989. — 305 с.: ил.
- 6 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция 2.01.07–85*: СП 20.13330.2016. — Введ. 2016-03-12. — М.: Минрегион России, 2016. — 104 с.: ил.
- 7 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*: СП 16.13330.2017. — Введ. 2017-27-02. — М.: Минрегион России, 2017. — 145 с.: ил.
- 8 Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений: МДС 20–2.2008. — Введ. 2008-05-05. — М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2008. — 15 с.: ил.
- 9 Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. — Введ. 2002-18-10. — М.: Москомархитектура, 2002. — 11 с.: ил.
- 10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7–05. — USA, VA, Reston: American Society of Civil Engineers, 2005. — 419 p.
- 11 ТКП EN 1991-1-3-2009 (02250). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 1–3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки. — Введ. 2010–01.01. — Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2009. — 42 с.: ил.
- 12 The NYC Construction Codes consist of the Building Code. — USA, NY, New York: NYC Construction, 2014. — 21 p.
- 13 Меркулов С. И. Схемы развития прогрессирующего разрушения зданий и сооружений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: журнал. — Курск, 2016. — С. 90–95.
- 14 Опыт проектирования большепролетного покрытия с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. П. Малышкин [и др.] // Вестн. Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. — Волгоград. — Вып. 38 (57). — С. 40–48.
- 15 Лазовский Д. Н. Расчет на прогрессирующее обрушение / Д. Н. Лазовский, А. В. Поправко, Т. М. Пецольд, В. Ю. Журавский // Прикладные науки: Сб. статей. — Минск, 2007. — Вып. 6. — С. 29–35.
- 6 Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redakciya 2.01.07–85*: SP 20.13330.2016. — Vved. 2016-03-12. — M.: Minregion Rossii, 2016. — 104 s.: il.
- 7 Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIIP II-23-81*: SP 16.13330.2017. — Vved. 2017-27-02. — M.: Minregion Rossii, 2017. — 145 s.: il.
- 8 Vremennye rekomendacii po obespecheniyu bezopasnosti bol'sheproletnyh sooruzhenij: MDS 20–2.2008. — Vved. 2008-05-05. — M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo», 2008. — 15 s.: il.
- 9 Rekomendacii po zashchite zhilyh karkasnyh zdaniy pri chrezvychajnyh situaciyah. — Vved. 2002-18-10. — M.: Moskomarhitektura, 2002. — 11 s.: il.
- 10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7–05. — USA, VA, Reston: American Society of Civil Engineers, 2005. — 419 p.
- 11 TKP EN 1991-1-3-2009 (02250). Evrokod 1. Vozdeystviya na konstrukcii. Ch. 1–3. Obshchie vozdeystviya. Snegovye nagruzki. — Vved. 2010–01.01. — Minsk: Ministrojarhitektury Resp. Belarus', 2009. — 42 s.: il.
- 12 The NYC Construction Codes consist of the Building Code. — USA, NY, New York: NYC Construction, 2014. — 21 p.
- 13 Merkulov S. I. Skhemy razvitiya progressiruyushchego razrusheniya zdaniy i sooruzhenij // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: zhurnal. — Kursk, 2016. — S. 90–95.
- 14 Opyt proektirovaniya bol'sheproletnogo pokrytiya s uchetom nedopushcheniya progressiruyushchego obrusheniya / A. P. Malyshekin [i dr.] // Vestn. Volgograd. gos. arh.-stroit. un-ta. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. — Volgograd. — Vyp. 38 (57). — S. 40–48.
- 15 Lazovskij D. N. Raschet na progressiruyushchee obrushenie / D. N. Lazovskij, A. V. Popravko, T. M. Pecol'd, V. Yu. Zhuravskij // Prikladnye nauki: Sb. statej. — Minsk, 2007. — Vyp. 6. — S. 29–35.

Spisok ispol'zovannoj literatury

- 1 Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnyye polozheniya: GOST 27751–2014. — Vved. 2014-11-12. — М.: Standartinform, 2015. — 14 с.: ил.
- 2 Zdaniya i sooruzheniya. Osobyе vozdeystviya: SP 296.1325800.2017. — Vved. 2017-03-08. — М.: Standartinform, 2017. — 23 с.: ил.
- 3 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse: UFC 4-023-03. — 2009-14-07. — USA: Department of Defense, 2005. — 245 p.
- 4 Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. — USA, DC, Washington: United States General Services Administration, 2003. — 119 p.
- 5 Posobie po proektirovaniyu zhilyh zdaniy. Vyp. 3. Konstrukcii zhilyh zdaniy (k SNIIP 2.08.01–85). — Vved. 1986-31-07. — М.: Strojizdat, 1989. — 305 с.: ил.