

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТРЕБОВАНИЙ ПО ЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ В ЗАКОНАДАТЕЛЬНО- НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ РОССИИ И СТРАНАХ ЕВРОСОЮЗА

АНДРОСОВА Н.Б., ВЕТРОВА О.А.

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена классификация методов защиты от прогрессирующего обрушения по трем основным категориям: меры вторичной защиты, косвенное проектирование и прямое проектирование. Приведен анализ требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-правовых и нормативных документах России и стран Евросоюза. Рассмотрены конкретные положения российских и европейских нормативных документов по проектированию устойчивости несущих конструкций зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения. А именно приведено сравнение требований по определению комбинаций нагрузок, значению особой нагрузки, к параметрам зоны ограничения локального разрушения в нормативных документах России, США, стран Евросоюза. Выполнен анализ экспериментально-технических исследований строительных конструкций при особых воздействиях. Большинство экспериментальных исследований проводились на железобетонных, стальных и композитных конструкциях, мало внимания уделяется исследованиям каменных и деревянных конструкций в этой области.

**Ключевые слова:** конструктивная безопасность, прогрессирующее обрушение, защита зданий и сооружений.

## THE ANALYSIS OF STUDIES AND REQUIREMENTS FOR THE PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE IN REGULATORY DOCUMENTS OF RUSSIA AND THE EUROPEAN UNION

ANDROSOVA N. B., VETROVA O. A.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

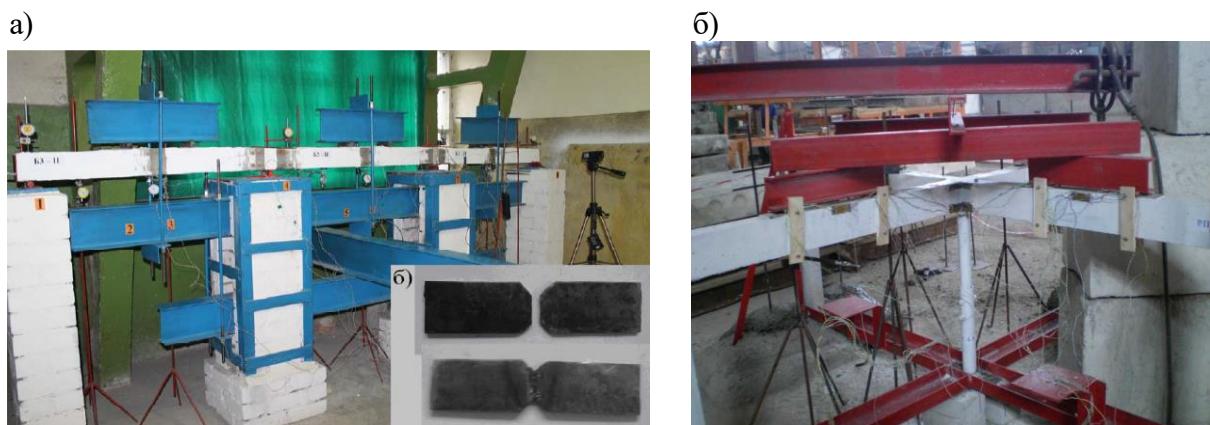
**Abstracts.** The classification of methods of protection against progressive collapse in three main categories: secondary protection measures, indirect design and direct design is considered. The analysis of the requirements for the protection of buildings and structures from progressive collapse in the legal and regulatory documents of Russia and the countries of the European Union. The specific provisions of the Russian and European normative documents on the design of stability of bearing structures of buildings and structures against progressive collapse are considered. Namely, a comparison of the requirements for the definition of load combinations, the value of the special load, to the parameters of the zone of limitation of local destruction in the normative documents of Russia, the USA, the EU countries. The analysis of experimental and technical studies of building structures under special influences is carried out. Most of the experimental studies were carried out on reinforced concrete, steel and composite structures, little attention is paid to the study of stone and wooden structures in this area.

**Keywords:** structural safety, progressive collapse, protection of building and structures.

**Введение.** В России с 2010 года действует Федеральный закон №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 г. В это же время с 2010 года во всех странах-членах Евросоюза нормативные документы Еврокоды заменили все национальные стандарты в области строительства для обеспечения единообразных требований к безопасности зданий и сооружений на всех стадиях жизненного цикла. Правительством РФ и профессиональным сообществом активно обсуждается вопрос гармонизации законодательной и нормативно-правовой базы в сфере градостроительства с нормативно-техническим обеспечением, а так же механизма качества и безопасности строительной продукции и услуг [1- 3].

**Краткий обзор публикаций и экспериментально-технических исследований строительных конструкций при особых воздействиях.** Параллельно с законодательной и нормотворческой деятельностью активно ведутся научные исследования в России и за рубежом [4- 6], которые дали возможность существенно доработать и улучшить существующие нормы и рекомендации в этой области. Профессорами Jose M. Adam, Fulvio Parisi, Juan Sagasete, Xinzhen Lu [6] выполнен полный обзор имеющихся масштабных исследований изучения строительных конструкций при особом воздействии в мире. Как правило, особое воздействие имитировалось включением одной или нескольких колонн. При разных сценариях разрушения строительных конструкций изучались: узлы между двумя балками и колоннами; рамы, образованные балками и колоннами; фрагменты строительных конструкций, построенных для экспериментов; фактические здания, рекомендованные к сносу. Важно отметить, большинство экспериментальных исследований проводились на железобетонных, стальных и композитных конструкциях, мало внимания уделяется исследованиям каменных и деревянных конструкций в этой области. Проанализируем проведенные экспериментальные исследования в зависимости от типа конструкций.

1. Узлы строительных конструкций. Экспериментальные испытания строительных конструкций на прогрессирующее разрушение выполнялись на узлах, образуемых двух пролётной балкой и несколькими колоннами. Профессором В.И. Колчуновым и его учениками были проведены испытания узлов многопролетных железобетонных балок [7], плоских и пространственных рамно-стержневых конструкций [8,9, 10] (рисунок 1). Запроектное воздействие имитировалось внезапным разрывом сварного шва прокалиброванной металлической закладной пластины узла балки и внезапным выключением телескопической центральной стойки-колонны фрагмента пространственной рамы.

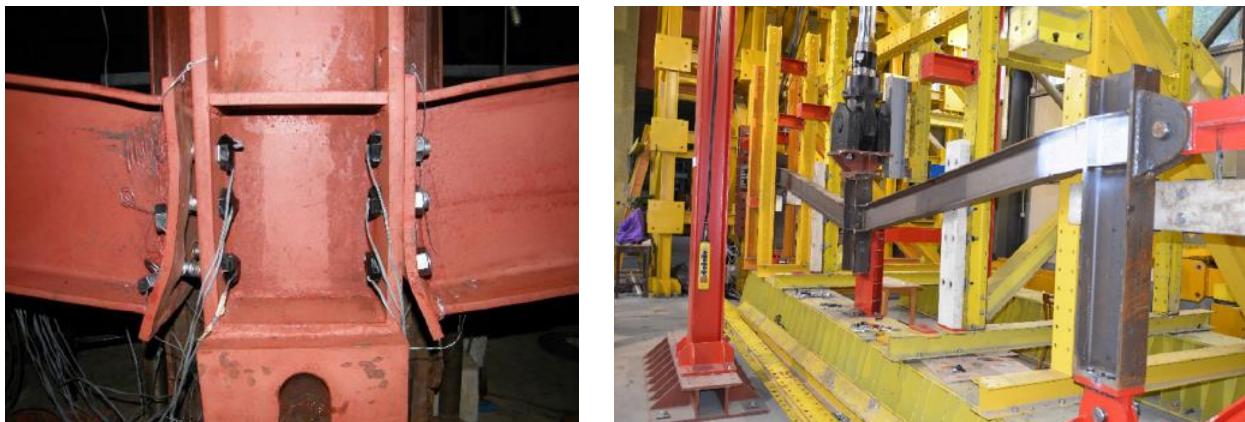


*Рисунок 1 – Общий вид испытаний неразрезных железобетонных балок (а); опытного фрагмента пространственной конструктивной системы в виде перекрёстных рам (б)*

В задачи экспериментальных исследований включалось: построение схем разрушения фрагментов железобетонных плоских и пространственных балочных и рамно-стержневых конструкций с выключающимися надопорной моментной и линейными связями; изучение особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения плоских и пространственных узлов сопряжения стержневых элементов при динамических дрогружениях, вызванных внезапным выключением линейных связей; установление количественных параметров

влияния эффекта пространственной работы и фактора времени на параметры живучести конструктивной системы.

2. Стальные и композитные конструкции. Важное значение в работе стальных каркасов имеет узловое соединение балки с колонной для обеспечения сопротивления прогрессирующему обрушению. Учеными Qin X., Wang W., Chen Y., Bao Y. были выполнены экспериментальные исследования [11-13] на различных типах сварных и болтовых типах соединений балки с колонной (рисунок 2) на аварийное воздействие.



*Рисунок 2 – Общий вид испытаний узлов соединения стальных конструкций*

В области конструкций из композитных материалов можно выделить работы ученых Yang B. [14] и Wang W. [15]. Изучалась несущая способность соединений двухпролетной стальной балки со стальными колоннами с использованием закладных деталей из композитных материалов при внезапном удалении одной из колонн.

3. Сборные и монолитные железобетонные конструкции. В России масштабные экспериментально-технические исследования за последние полтора десятилетия проведены в рамках программ фундаментальных исследований РААСН [16,17,18], ОрелГТУ [7,8,19,20] и Юго-Западного государственного университета [10,21-23] в области конструктивной безопасности и живучести сборных и монолитных железобетонных конструктивных систем (рисунок 3).

Целый ряд научных работ по рассматриваемой проблеме проведен в «ЦНИИ-Промзданий». Широко известны исследования В.В. Гранева, Э.Н. Кодыша, Н.Н. Трекина, И.К. Никитина по проектированию и обеспечению устойчивости сборных железобетонных связевых каркасов от прогрессирующего обрушения [24,25], а также работы Айзенберга, Кодыша, Никитина, Смирнова [26] по сейсмостойким многоэтажным зданиям с железобетонным каркасом. Результаты этих исследований обобщены в монографиях, нормативно-технических документах (СТО, рекомендации по проектированию и др.) по защите зданий от прогрессирующего обрушения [27,28].

За рубежом ученым Ren и его коллегами [29] проведены испытания совместной работы ригеля и плит при выключении центральной колонны (рисунок 4). Выключение колонны имитировалось гидравлическим домкратом. Аналогично российским экспериментальным исследованиям плоских рамно-стружневых конструкций при аварийный воздействиях учеными Nimse [30], Kang [31] и др. проводились экспериментальные исследования плоских рамно-стружневых конструкций с монолитными и сборными узловыми соединениями при выключении центральной колонны. Отдельная серия испытаний была с использованием цементных композитов для соединения балки и колонны.



*Рисунок 3 – Экспериментальные исследования железобетонных конструкций в России при аварийных воздействиях - общий вид испытаний: многопролетных балочных конструкций сплошного и составного сечения (а); плоских рамно-стержневых конструкций сплошного и составного сечения, в том числе с преднапряженным ригелем (б); многоэтажной монолитной рамно-стержневой конструктивной системы (в); фрагмента пространственной рамно-стержневой конструкции (г); модели ребристой плиты (д) и фрагмента призматической складки (е)*



*Рисунок 4 – Общий вид испытаний балочных плит*

4. Фактические здания, подлежащие к сносу. Испытания натурных строительных конструкций задний на аварийные воздействия в лабораторных условиях достаточно сложный и дорогостоящий эксперимент. Поэтому некоторые ученые провели экспериментальные исследования на существующих зданиях, запланированных к сносу. Например, в области стальных профессоры Song и Sezen [32] провели экспериментальные исследования на здание

*№1 (81) 2019 (январь-февраль)*

университетского кампуса в штате Огайо США. В ходе эксперимента внезапно выключили четыре колонны по периметру стального каркаса 4-этажного здания (1950 года постройки) без разрушения внешних стен и перегородок, произошло локальное разрушение (рисунок 5). Результаты использованы для создания альтернативных путей нагружения рассматриваемых конструктивных систем зданий при аварийных воздействиях.



*Рисунок 5 – Здание университетского кампуса в штате Огайо США, использованное для натурных экспериментальных исследований*



*Рисунок 6 – Здание отеля в Сан-Диего, использованное для натурных экспериментальных исследований*

Наиболее масштабные экспериментальные исследования в области железобетонных конструкций выполнены профессором Sasani и его коллегами [33]. Испытания по внезапному удалению несущих железобетонных элементов каркасов проводились на 10-этажном здании (1985 года постройки) в Университете Арканзаса, на 6-этажном здании отеля Сан-Диего (1914 года постройки) (рисунок 6), на 20-этажном здании госпиталя (1956 года постройки) в городе Мемфис США, на 11-этажном здании отеля Crowne Plaza (1973 года постройки) в Хьюстоне. В ходе экспериментальных исследований внезапно удаляли: одну или несколько колонны по периметру здания первого и второго этажей, внутренние несущие стены и перегородки. Изучалось перераспределение усилий в конструкциях после повреждения и высотности здания.

**Методы защиты от прогрессирующего обрушения зданий и сооружений.** На сегодняшний день из работ ученых [5,34,35] ясно, что не существует универсальных правил проектирования и защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Тем не менее, для предотвращения или ограничения прогрессирующего обрушения после отказа одного из несущих элементов конструктивной системы (непредусмотренное гипотетическое воздействие) в зависимости от идентификации здания и сооружения предложены различные методы защиты [36-39]. Российскими [37] и европейскими учеными [40] рассмотрена классификация методов защиты от прогрессирующего обрушения по трем основным категориям: меры вторичной защиты, косвенное проектирование и прямое проектирование.

**Меры вторичной защиты** направлены на предотвращение или снижения влияния событий, вызывающих особые нагрузки на конструкции с использованием защитных мер [37]. Особыми нагрузками могут быть: защитные барьеры вокруг колонн, локализация здания от многолюдных мест, контроль за посетителями объектов, специальная окраска поверхностей, повышающая сопротивление огневому или взрывному воздействию и т.д. Важно заметить, что рассматриваемые меры не увеличивают стойкость конструкции к прогрессирующему обрушению зданий и сооружений.

**Косвенное проектирование** основано на требованиях к конструкциям для обеспечения защиты от прогрессирующего разрушения. Например, профессоры M. Fintel и D.M. Schultz [41] для описания этого подхода использовали термин «общая структурная целостность». Другими словами – это метод структурного синтеза конструктивной системы с созданием наперед заданных требований эффективно выполняющих функциональные свойства. Проектирование

конфигурации конструктивной системы заключается в определении ее топологии, геометрии и параметров армирования сечения [36].

**Метод прямого проектирования** используется непосредственно при проектировании и конструировании каркасов зданий и сооружений. Этот метод разделяется на: альтернативные пути силового сопротивления (ALP), при котором требуется, чтобы конструкция была способна сохранить несущую способность после утраты конструктивного элемента и разрушения были бы локализованы посредством перераспределения усилий через конструктивные связи; метод назначения локального сопротивления (SLR или Key) – метод, который требует, чтобы здание или его часть обладали сопротивлением специальным нагрузкам и воздействиям. Авторами работы [42] отмечено, что меры вторичной защиты и косвенного проектирования не всегда эффективны, особенно для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности и с массовым пребыванием людей. Меры активной защиты (прямое проектирование) наиболее целесообразны для таких объектов капитального строительства, требования, по защите которых отражены во многих законодательных и нормативно-правовых документах разных стран.

В отдельную группу можно выделить метод проектирования устойчивости зданий и сооружений, основанный на методе риска (вероятностный подход).

**Сравнительный анализ основных требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах.** Великобритания стала одной из первых стран, которая включила основные положения по оценке прогрессирующего обрушения зданий в свои стандарты. Основные положения мер защиты от прогрессирующего обрушения приведены в BS 6399 [43]. Отдельные требования по защите от прогрессирующего обрушения для стальных, железобетонных и каменных конструкций приведены в BS 5950 [44], BS 8110 [45], BS5628 [46] соответственно.

В Еврокоде EN 1991-1-7 [47] приводятся положения (стратегии и правила) для проектирования зданий против идентифицируемых и неидентифицируемых особых воздействий. Однако в части 1.1 (6) Еврокода EN 1991-1-7 [47] указывается, что данный документ конкретно не рассматривает особые воздействия, вызванные внешними взрывами, военными и террористическими актами. Таким образом, проектирование конструкций против возможной угрозы террористического нападения должно проводиться в соответствии с положениями на указанное особое воздействие.

В России обязательные требования по расчету на устойчивость против прогрессирующего обрушения зданий и сооружений повышенного уровня ответственности были впервые включены в Федеральный закон №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» 30 декабря 2009 г. Для реализации этого требования разработаны и вступили в действие следующие нормативные документы: СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» [48], СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» [49].

Результаты выполненного анализа и систематизация основных положений национальных нормативных документов по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения России, стран Евросоюза и США сведены в таблицу 1.

Отказ одной из несущих конструкций здания или сооружения по неизвестным причинам необходимо рассматривать как непредусмотренное гипотетическое воздействие. Только в Еврокодах указывается значение условной статической нагрузки (особой нагрузки) (34кПа), на которую рассчитывают и проектируют несущие «ключевые» конструкции здания. Многие ученые подвергают сомнению это значение и считают завышенным. В нормативных документах США отражен альтернативный метод нагружения (ALP) вместо требований к сопротивлению разрушения локальных зон, понятие «особая нагрузка» («accidental load») вообще отсутствует.

На основе требований к параметрам зоны локального разрушения в нормативных документах разных стран можно сделать вывод, что наименьшая предельная площадь зон локального разрушения в российских нормах. Тем не менее, что очень важно, что предельная зона локального разрушения нормируется для конкретного типа здания.

**Таблица 1 – Сравнение требований комбинаций нагрузок, значению особой нагрузки, к параметрам зоны ограничения локального разрушения в нормативных документах России, США, стран Евросоюза**

Нормативный документ	Комбинации нагрузок для особой расчетной ситуации	Особая нагрузка (accidental load)	Требования к локальной зоне разрушения
СП 296.1325800.2017 [48], СП 20.13330.2016 [50], (Россия)	Особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок: $C_s = C_m + Ps,$ где $C_m$ – нагрузка для основного сочетания, состоящая из постоянных $P_d$ , длительных $P_l$ и кратковременных $P_i$ ; $C_s$ – нагрузка для особого сочетания; $\psi_i$ ( $i=1,2,3\dots$ ) ( $\psi_{1l}=1,0$ ; $\psi_{l2}=\psi_{l3}=\dots=0,95$ ) – коэффициенты сочетаний для длительных нагрузок; $\psi_u$ ( $i=1,2,3\dots$ ) – коэффициенты сочетаний для кратковременных нагрузок; $Ps$ – особая нагрузка (взрывная; нагрузка, вызываемая резким нарушением технологического процесса; воздействия, обусловленные деформациями основания; нагрузки, обусловленные пожаром; ударная нагрузка от столкновения транспортных средств с частями сооружения; экстремальные климатические (снежные, ветровые, температурные и гололедные) нагрузки).	-	При расчете несущих конструкций одного (любого) этажа здания и сооружения зону локального разрушения определяют кругом площадью не менее $28 \text{ m}^2$ (диаметр 6,0 м) для зданий и сооружений при высоте до 75 м; не менее $80 \text{ m}^2$ (диаметр 10 м) для зданий и сооружений высотой от 75 до 200 м; не менее $100 \text{ m}^2$ (диаметр 11,5 м) для зданий и сооружений более 200 м. В одноэтажных производственных зданиях следует рассматривать разрушение или удаление несущей конструкции на участке указанного размера (при размещении центра круга в центре тяжести сечения одной из колонн).
BS [43] (Великобритания)	$D+L/3+W/3$ , где $D$ - постоянная нагрузка, $L$ - временная нагрузка, $W$ - ветровая нагрузка, $S$ - снеговая нагрузка.	34 кПа	15% перекрытия или площадь перекрытия $70 \text{ m}^2$ (в зависимости от того, что меньше).
Eurocode [47,51] (Евросоюз)	$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ или } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i},$ где $G$ – постоянная нагрузка, $P$ – уровень пред напряжения; $A$ – особая нагрузка; $Q$ – кратковременная нагрузка.	34 кПа	Предельная зона локального разрушения нормируется для типа здания. Рекомендуемое значение составляет 15% перекрытия или $100 \text{ m}^2$ перекрытия в зависимости от того, что меньше на каждом из двух смежных этажей.
GSA [52] (США)	2·( $D+0,25\cdot L$ ) (статический расчет), где $D$ - постоянная нагрузка, $L$ - временная нагрузка.  $D+0,25\cdot L$ (динамический расчет), где $D$ - постоянная нагрузка, $L$ - временная нагрузка.		Конструктивный участок, связанный с удаленной колонной равен: $167 \text{ m}^2$ перекрытия прямо над крайней удаленной колонной; $334 \text{ m}^2$ перекрытия прямо над внутренней удаленной колонной.
UFC 4-023-03 [53] (США)	2·[(0,9 или 1,2)· $D+(0,5\cdot L$ или $0,2\cdot S)+0,2\cdot W_n]$ (нелинейный статический расчет), где $D$ - постоянная нагрузка, $L$ - временная нагрузка, $W$ - ветровая нагрузка, $S$ - снеговая нагрузка.  $(0,9 \text{ или } 1,2)D+(0,5L \text{ или } 0,2S)+0,2W_n$ (нелинейный динамический расчет), где $D$ - постоянная нагрузка, $L$ - временная нагрузка, $W$ - ветровая нагрузка, $S$ - снеговая нагрузка.	-	Конструктивный участок, связанный с удаленной колонной равен: $167 \text{ m}^2$ перекрытия прямо над крайней удаленной колонной; $334 \text{ m}^2$ перекрытия прямо над внутренней удаленной колонной.

**Выводы.** На сегодняшний день большинство исследований по прогрессирующему обрушению конструкций выполнено на монолитных железобетонных, стальных и композитных конструкциях. Примечательно, что каркасы из сборных железобетонных конструкций наиболее часто используются для зданий и сооружений с массовым нахождением людей, и имеющихся исследований в этой области недостаточно. Экспериментальные исследования напрямую влияют на дальнейшее развитие нормативных документов в области конструктивной безопасности зданий и сооружений. Большинство требований в имеющихся нормативных документах применимы только к вновь проектируемым зданиям и сооружениям. Не ясно, какие конструктивные мероприятия необходимы для реконструируемых и эксплуатируемых зданий и сооружений для увеличения их надежности и устойчивость прогрессирующему обрушению при аварийном воздействии. В заключении можно заметить, что дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в этой области необходимы для детального изучения перераспределения усилий в конструктивной системе и напряженно-деформированного состояния конструкций на особое воздействие, особенно эксплуатируемых и реконструируемых зданий и сооружений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Ю.С. Вопросы применения в Российской практике Еврокода-2 «Железобетонные конструкции зданий» (европейский стандарт EN1992-1-1) // Бетон и железобетон. 2014. №6. С. 2-3.
2. Травуш В.И., Волков Ю.С. О противоречиях обязательности и добровольности применения строительных норм // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. №3. С. 18-20.
3. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2015. №8. С. 51-65.
4. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95-101.
5. Травуш В.И., Колчунов В.И., Клюева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4-11.
6. Jose M. Adam , Fulvio Parisi, Juan Sagaseta, Xinzhen Lu Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 122-149.
7. Клюева Н.В., Шувалов К.А. Экспериментальные исследования живучести предварительно напряженных железобетонных балочных систем // Строительство и реконструкция. 2012. №5. С. 13-22.
8. Колчунов В.И., Кудрина Д.В. Экспериментально-теоретические исследования преднапряженных железобетонных элементов рам в запредельных состояниях // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. №3. С. 14-17.
9. Колчунов Вл.И., Клюева Н.В., Бухтиярова А.С. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2011. №5. С. 21-32.
10. Емельянов С.Г., Федорова Н.В., Колчунов В.И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных здания из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы, 2017. - №3. – С. 23-27.
11. Qin X., Wang W., Chen Y., Bao Y. Experimental study of through diaphragm connection types under a column removal scenario // Journal of Constructional Steel Research. 2015. Vol. 112. Pp. 293-304.
12. Qin X., Wang W., Chen Y., Bao Y. A special reinforcing technique to improve resistance of beam-to-tubular column connections for progressive collapse prevention // Engineering Structures. 2016. Vol. 117. Pp. 26-39.
13. Wang W., Fang C., Qin X., Chen Y., Li L. Performance of practical beam-to-SHS column connections against progressive collapse // Engineering Structures. 2016. Vol. 106. Pp. 332-347.
14. Yang B., Tan KH. Experimental study about composite frames under an internal column-removal scenario / Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 121. Pp. 341-351.
15. Wang W., Wang J., Sun X., Bao Y. Slab effect of composite subassemblies under a column removal scenario // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 129. Pp. 141-155.
16. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С 28-24.
17. Александров А.В., Матвеев А.В. О критериях поведения отдельных стряжней в момент потери устойчивости упругой системы // Ресурсо- и энергосбережение как мотивация творчества в архитектурно-строительном производстве: труды годичного собрания РААСН. Москва-Казань, 2003. С 428-431.
18. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2018. №5. С. 73-80.

19. Осовских Е.В., Колчунов В.И., Афонин П.А. Экспериментальные исследования деформирования и разрушения модели фрагмента железобетонного складчатого покрытия в запредельных состояниях // Строительство и реконструкция. 2012. №1. С. 22-27.
20. Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С., Клюева Н.В. К определению критериев живучести фрагмента пространственной рамно-стержневой системы // Строительство и реконструкция. 2010. №6. С. 3-7.
21. Клюева Н.В., Кореньков П.А. Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №2. С. 44-48.
22. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Алькади С.А. Экспериментальные исследования фрагмента каркаса многоэтажного здания с железобетонными элементами составного сечения // Строительство и реконструкция. 2016. №6. С. 13-21.
23. Клюева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С. Прочность и деформативность сборно-монолитных каркасов жилых зданий пониженной материалаомкости при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №1. С. 5-9.
24. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом. М.: Издательство АСВ, 2009. 346с.
25. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: Издательство АСВ, 2010. 352с.
26. Айзенберг Я.М., Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Смирнов В.И., Трекин Н.Н. Сейсмостойкие многоэтажные здания с железобетонным каркасом. Москва: Издательство АСВ, 2012. 264с.
27. «Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения» Москкомархитектура, М., 2006.
28. СТО-008-02495342-2009. Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий.
29. Ren P., Li Y., Lu X., Guan H., Zhou Y. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario // Engineering Structures. 2016. Vol. 118. Pp. 28-40.
30. Nimse RB., Joshi DD., Patel PV. Behaviour of wet precast beam column connections under progressive collapse scenario: an experimental study // Engineering Structures. 2014. Vol. 6. Pp. 149-159.
31. Kang SB., Tan KH., Yang EH. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious-composites // Engineering Structures. 2015. Vol. 98. Pp. 186-200.
32. Song BI., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building // Engineering Structures. 2013. Vol. 56. Pp. 664-672.
33. Sasani M., Kazemi A., Sagiroglu S., Forest S. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to initial damage // Engineering Structures. 2011. Vol. 137. Pp. 893-902.
34. Byfield M., Mudalige W., Morison C., Stoddart E. A review of progressive collapse research and regulations // Proceeding of the institution of civil engineers – Structures and Building. 2014. Vol. 167. Pp. 447-456.
35. Ellingwood BR., Smilowitz R., Dusenberry DO., Duthinh D., Lew HS., Carino NJ., Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. NISTIR 7396. National Institute of Science and Technology, US Department of Commerce; 2007.
36. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с.
37. Алмазов В.О., Кхой Кау Зуй Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.: Издательство АСВ, 2013. 128 с.
38. Емельянов С.Г., Федорова Н.В., Колчунов В.И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы. 2017. №3. С. 23-27.
39. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Шапиро Г.И. Нормирование в крупнопанельном домостроении: новый свод правил по проектированию крупнопанельных конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №2. С. 10-15.
40. Kokot Seweryn, Solomos George Progressive collapse risk analysis: literature survey, relevant construction standards and guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. 80 p.
41. Fintel M., Schultz D.M. Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings // Journal of the Prestressed Concrete Institute. 1976. Vol. 21. No 21. Pp. 46-69.
42. Клюева Н.В., Андросова Н.Б. Некоторые предложения для конструктивной защиты зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения // Строительство и реконструкция. 2015. №4. С. 72-78.
43. BS 6399. Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead and imposed loads. British Standards Institute, 1996.
44. BS 5950. Structural use of steelwork in building: Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. British Standards Institute, 2000.
45. BS 8110. BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction. British Standards Institute, 2000.

46. BS 5628. BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use of unreinforced masonry. British Standards Institute, 1978.
47. EN 1991-1-7. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions, 2009.
48. СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия». М., 2017 г.
49. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». М., 2018 г.
50. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». М., 2016 г.
51. EN 1990. Eurocode 0 - EN 1990: Basis of structural design, 2002.
52. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016.
53. UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 july 2009, change 3, 1 november 2016.

## REFERENCES

1. Volkov Yu.S. Voprosy primeneniya v Rossiyskoy praktike Yevrokoda-2 «Zhelezobetonnyye konstruktsii zdaniy» (yevropeyskiy standart EN1992-1-1) [Questions of application in the Russian practice of Eurocode-2 "Reinforced concrete structures of buildings" (European standard EN1992-1-1)]. *Beton i zhelezobeton*. 2014. No 6. Pp. 2-3.
2. Travush V.I., Volkov Yu.S. O protivorechiyakh obyazatel'nosti i dobrovol'nosti primeneniya stroitel'nykh norm [On the contradictions of compulsory and voluntary application of construction standards]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2018. No 3. Pp. 18-20.
3. Almazov V.O., Arutyunyan S.N. Proyektirovaniye stalezhelezobetonnykh plit perekrytiy po Yevrokodu 4 i rossiyskim rekomendatsiyam [Designing composite concrete floor slabs for Eurocode 4 and Russian recommendations]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 8. Pp. 51-65.
4. Kodysh E.N. Proyektirovaniye zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchetom vozniknoveniya osobogo predel'nogo sostoyaniya [Designing the protection of buildings and structures from progressive collapse, taking into account the occurrence of a special limit state]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No 10. Pp. 95-101.
5. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V. Nekotoryye napravleniya razvitiya teorii zhivuchesti konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzheniy [Some directions of development of the theory of survivability of constructive systems of buildings and structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. No 3. Pp. 4-11.
6. Jose M. Adam, Fulvio Parisi, Juan Sagaseta, Xinzheng Lu Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122-149.
7. Klyuyeva N.V., Shuvalov K.A. Eksperimental'nyye issledovaniya zhivuchesti predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh balochnykh sistem [Experimental studies of the survivability of prestressed concrete girder systems]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012. No 5. Pp. 13-22.
8. Kolchunov V.I., Kudrina D.V. Eksperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya prednapryazhennykh zhelezobetonnykh elementov ram v zapredel'nykh sostoyaniyah [Experimental and theoretical studies of prestressed reinforced concrete frame elements in transcendental states]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy*. 2010. No 3. Pp. 14-17.
9. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Bukhtiarova A.S. Soprotivleniye prostranstvennykh uzlov sopryazheniya zhelezobetonnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh [Resistance of spatial junctions of reinforced concrete frameworks of multi-storey buildings with beyond design impacts]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2011. No 5. Pp. 21-32.
10. Emel'yanov S.G., Fedorova N.V., Kolchunov V.I. Osobennosti proyektirovaniya uzlov konstruktsiy zhilykh i obshchestvennykh zdaniya iz panel'no-ramnykh elementov dlya zashchity ot progressiruyushchego obrusheniya [Features of the design of structural units of residential and public buildings of panel-frame elements to protect against progressive collapse]. *Stroitel'nyye materialy*. 2017. No 3. Pp. 23-27.
11. Qin X., Wang W., Chen Y., Bao Y. Experimental study of through diaphragm connection types under a column removal scenario. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 112. Pp. 293-304.
12. Qin X., Wang W., Chen Y., Bao Y. A special reinforcing technique to improve resistance of beam-to-tubular column connections for progressive collapse prevention // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 117. Pp. 26-39.
13. Wang W., Fang C., Qin X., Chen Y., Li L. Performance of practical beam-to-SHS column connections against progressive collapse. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 106. Pp. 332-347.
14. Yang B., Tan KH. Experimental study about composite frames under an internal column-removal scenario. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. Pp. 341-351.
15. Wang W., Wang J., Sun X., Bao Y. Slab effect of composite subassemblies under a column removal scenario. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 129. Pp. 141-155.
16. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Kontseptsiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy pri silovykh i sredovykh vozdeystviyakh [The concept and directions of development of the the-

ory of constructive safety of buildings and structures under power and environmental influences]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. No 2. Pp. 28-24.

17. Aleksandrov A.V., Matveyev A.V. O kriteriyakh povedeniya otdel'nykh strelzney v moment poteri ustoichivosti uprugoy sistemy [On the criteria for the behavior of individual rods at the moment of loss of stability of the elastic system]. Resurs- i energosberezhniye kak motivatsiya tvorchestva v arkitekturno-stroitel'nom proizvodstve: trudy godichnogo sobraniya RAASN [Resource and energy saving as a motivation for creativity in the architectural and construction industry: proceedings of the annual meeting of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]. Moscow-Kazan, 2003. Pp. 428-431.

18. Travush, V.I., Fedorova, N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 81(5). Pp. 73–80. doi: 10.18720/MCE.81.8.

19. Osovskikh Ye.V., Kolchunov V.I., Afonin P.A. Eksperimental'nyye issledovaniya deformirovaniya i razrusheniya modeli fragmenta zhelezobetonnogo skladchatogo pokrytiya v zapredel'nykh sostoyaniyah [Experimental studies of the deformation and fracture of a model of a fragment of a reinforced concrete folded surface in outragous states]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012. No 1. Pp. 22-27.

20. Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S., Klyuyeva N.V. K opredeleniyu kriteriyev zhivuchesti fragmenta prostranstvennoy ramno-sterzhnevoy sistemy [On the definition of criteria for survivability of a fragment of a spatial frame-rod system] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2010. No 6. Pp. 3-7.

21. Klyuyeva N.V., Koren'kov P.A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh ramno-strezhnevых konstruktivnykh system [Methods of experimental determination of the survivability parameters of reinforced concrete frame-structural structural systems]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No 2. Pp. 44-48.

22. Kolchunov V.I., Osovskikh Ye.V., Al'kadi S.A. Eksperimental'nyye issledovaniya fragmenta karkasa mnogoetazhnogo zdaniya s zhelezobetonnymi elementami sostavnogo secheniya [Experimental studies of a fragment of a high-rise building frame with reinforced concrete elements of a composite section]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 6. Pp. 13-21.

23. Klyuyeva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Bukhtiyarova A.S. Prochnost' i deformativnost' sborno-monolitnykh karkasov zhilykh zdaniy ponizhennoy materialoyemkosti pri zaproyektivnykh vozdeystviyah [Strength and deformability of prefabricated monolithic frames of residential buildings of low material consumption during beyond design impacts]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. No 1. Pp. 5-9.

24. Kodysh E.N., Trekin N.N., Nikitin I.K. *Proyektirovaniye mnogoetazhnykh zdaniy s zhelezobetonnym karkasom* [Design of multi-storey buildings with a reinforced concrete frame]. Moscow: Publishing ASV, 2009. 346 p.

25. Kodysh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy iz tyazhelogo betona po prochnosti, treshchinostyosti i deformatsiyam* [Calculation of reinforced concrete structures made of heavy concrete for strength, crack resistance and deformation]. Moscow: Publishing ASV, 2010. 352 p.

26. Ayzenberg YA.M., Kodysh E.N., Nikitin I.K., Smirnov V.I., Trekin N.N. *Seysmostoykiye mnogoetazhnyye zdaniya s zhelezobetonnym karkasom* [Earthquake-resistant multi-storey buildings with a reinforced concrete frame]. Moscow: Publishing ASV, 2012. 264 p.

27. «Rekomendatsii po zashchite vysotnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya» ["Recommendations for the protection of high-rise buildings from progressive collapse"] Moskomarkhitektura, Moscow, 2006.

28. STO-008-02495342-2009. *Predotvratleniye progressiruyushchego obrusheniya zhelezobetonnykh monolitnykh konstruktsiy zdaniy* [Prevention of progressive collapse of reinforced concrete monolithic structures of buildings].

29. Ren P., Li Y., Lu X., Guan H., Zhou Y. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 118. Pp. 28-40.

30. Nimse RB., Joshi DD., Patel PV. Behaviour of wet precast beam column connections under progressive collapse scenario: an experimental study // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 6. Pp. 149-159.

31. Kang SB., Tan KH., Yang EH. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious-composites. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 98. Pp. 186-200.

32. Song BI., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 56. Pp. 664-672.

33. Sasani M., Kazemi A., Sagiroglu S., Forest S. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to initial damage. *Engineering Structures*. 2011. Vol. 137. Pp. 893-902.

34. Byfield M., Mudalige W., Morison C., Stoddart E. A review of progressive collapse research and regulations. *Proceeding of the institution of civil engineers – Structures and Building*. 2014. Vol. 167. Pp. 447-456.

35. Ellingwood BR., Smilowitz R., Dusenberry DO., Duthinh D., Lew HS., Carino NJ., Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. NISTIR 7396. National Institute of Science and Technology, US Department of Commerce; 2007.

36. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. *Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektivnykh vozdeystvii* [The survivability of buildings and structures under the design impact]. Moscow: Publishing ASV, 2014. 208 p.

37. Almazov V.O., Kkhoy Kao Zuy Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov [Dynamics of progressive destruction of monolithic multistory skeletons]. Moscow: Publishing ASV, 2013. 128 p.
38. Emel'yanov S.G., Fedorova N.V., Kolchunov V.I. Osobennosti proyektirovaniya uzlov konstruktsiy zhilykh i obshchestvennykh zdaniy iz panel'no-ramnykh elementov dlya zashchity ot progressiruyushchego obrusheniya [Features of the design of nodes of structures of residential and public buildings of panel-frame elements to protect against progressive collapse]. *Stroitel'nyye materialy*. 2017. No 3. Pp. 23-27.
39. Zenin S.A., Sharipov R.SH., Kudinov O.V., Shapiro G.I. Normirovaniye v krupnopanel'nom domostroyenii: novyy svod pravil po proyektirovaniyu krupnopanel'nykh konstruktivnykh system [Rationing in large-panel housing construction: a new set of rules for designing large-panel structural systems]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No 2. Pp. 10-15.
40. Kokot Seweryn, Solomos George Progressive collapse risk analysis: literature survey, relevant construction standards and guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. 80 p.
41. Fintel M., Schultz D.M. Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings // Journal of the Prestressed Concrete Institute. 1976. Vol. 21. No 21. Pp. 46-69.
42. Klyuyeva N.V., Androsova N.B. Nekotoryye predlozheniya dlya konstruktivnoy zashchity i sooruzheniy ot progressiruyushchego razrusheniya [Some proposals for the constructive protection of buildings and structures from progressive destruction]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No 4. Pp. 72-78.
43. BS 6399. Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead and imposed loads. British Standards Institute, 1996.
44. BS 5950. Structural use of steelwork in building: Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. British Standards Institute, 2000.
45. BS 8110. BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction. British Standards Institute, 2000.
46. BS 5628. BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use of unreinforced masonry. British Standards Institute, 1978.
47. EN 1991-1-7. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions, 2009.
48. SP 296.1325800.2017 Zdaniya i sooruzheniya. Osobyye vozdeystviya [Building Code of Russian Federation SP 296.1325800.2017 Buildings and facilities. Accidental impacts]. Moscow, 2017.
49. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proyektirovaniya. Osnovnyye polozheniya [Building Code of Russian Federation SP 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions]. Moscow, 2018.
50. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdeystviya [Building Code of Russian Federation SP 20.13330.2016 Loads and impacts]. Moscow, 2016.
51. EN 1990. Eurocode 0 - EN 1990: Basis of structural design, 2002.
52. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016.
53. UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 july 2009, change 3, 1 november 2016.

### Информация об авторах:

#### **Андросова Наталья Борисовна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия,  
к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций и материалов  
E-mail: ramia84@rambler.ru

#### **Ветрова Ольга Анатольевна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия,  
к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций и материалов  
E-mail: vetrovaoly@mail.ru

### Information about authors:

#### **Androsova Natalia B.**

Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia,  
Ph. D., associate Professor of the Department of building structures and materials  
E-mail: ramia84@rambler.ru

#### **Vetrova Olga A.**

Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia,  
Ph. D., associate Professor of the Department of building structures and materials,  
E-mail: vetrovaoly@mail.ru