

УДК 69.059.22

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-205-215

**ОБЗОР МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СТАЛЬНЫХ И СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, Н.С. КУРЧЕНКО²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
*Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337*²Брянский государственный инженерно-технологический университет
*проспект Станке Димитрова, д. 3, Брянск, Россия, 241037**(поступила в редакцию: 26 декабря 2017 г.; принята к публикации: 21 апреля 2018 г.)*

В статье выполнен обзор современных экспериментальных исследований силового сопротивления наиболее распространенных стальных и сталебетонных строительных конструкций в запредельных состояниях. Выявлены основные направления постановок экспериментов при некоторых типах особых воздействий, влияющих на обеспечение механической безопасности сооружений. Рассмотрены изложенные в современной научной литературе экспериментальные исследования живучести стальных и сталебетонных пластинчато-стержневых элементов сооружений при локальных повреждениях колонн. Описываются испытания пластинчатых и легких стальных тонкостенных конструкций на действие циклической знакопеременной нагрузки. Приводятся данные по предельным статическим нагрузкам балок и пространственных рамных систем. Уделено внимание испытаниям конструкций на комбинированные ударные и взрывные воздействия. Исследования иллюстрируются фотографиями и схемами лабораторных образцов и натуральных объектов. По результатам обзора делается вывод о перспективах дальнейших исследований живучести стальных конструкций при запроектных воздействиях. Отмечается необходимость расширения номенклатуры нормируемых типов запроектных воздействий, что позволит более эффективно выполнять комплекс превентивных мероприятий, обеспечивающих повышенную механическую безопасность сооружений и минимизацию потенциальных рисков материальных и социальных потерь при возникновении аварийных ситуаций.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, запроектные воздействия, взрыв, удар, удаление опор, предельное нагружение, натуральный эксперимент, лабораторные испытания

**REVIEW OF METHODS AND RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS
OF STEEL AND STEEL CONCRETE STRUCTURES UNDER SPECIAL IMPACT**A.V. ALEKSEYITSEV¹, N.S. KURCHENKO²¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)
*26 Yaroslavskeye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*²Bryansk State University of Engineering and Technology
*3 Stanke Dimitrov Prospekt, Bryansk, 241037, Russian Federation**(received: December 26, 2017; accepted: April 21, 2018)*

The modern experimental studies review of the resistance of the most common steel and steel-concrete building structures in emergency conditions is performed. The main directions of experimental design are revealed under certain types of special influences that affect the mechanical safety of structures. An overview of the experimental studies of steel and steel-concrete lamellar-structural elements survivability in local damage to columns, described in the modern scientific literature is presented. Tests of lamellar and light steel thin-walled structures on the effect of cyclic loading are described. Data on the limit static loads of beams and spatial frame systems are given. Attention to testing of structures for combined impact and explosive effects is paid. Photos and diagrams of laboratory samples and objects are given. As a result of the review, a conclusion is made about the prospects for further studies of the survivability of steel structures under emergency actions.

It is noted, that now there is a need to expand the nomenclature of standardized types of emergency actions. That will allow to more effectively carrying out a complex of preventive measures that let us to increase the mechanical safety of structures and minimize potential risks of material and social losses in the event of emergencies.

Keywords: experimental studies, emergency actions, explosion, impact, removal of supports, limit loading, full-scale experiment, laboratory tests

Введение. Проблема обеспечения живучести несущих конструкций зданий и сооружений является одной из центральных в современной строительной науке [1–4]. Для решения ряда задач по данному направлению разрабатываются новые методы расчетов, основой верификации которых часто являются лабораторные или натурные испытания. Для достаточно распространенных железобетонных конструкций в настоящее время в данном направлении проведен значительный объем экспериментально-теоретических исследований [1; 5; 6]. Наименее изученными представляются вопросы экспериментальных исследований стальных конструкций при воздействиях, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации (запроектных воздействиях). В частности, имеют важность опыты, изучающие динамическое поведение стальных и сталебетонных конструкций. В настоящей статье приводится краткое описание экспериментальных исследований балочных, рамных и пластинчатых объектов со стальными конструкциями при испытаниях на запроектные воздействия. Целью работы является актуализация основных направлений опытного изучения живучести таких объектов.

Направления экспериментальных исследований. Как для моделей (лабораторных образцов), так и для натуральных сооружений рассматриваются следующие основные виды нагружений:

- локальное повреждение одной или нескольких опор, в том числе и с последующим взаимодействием поврежденной конструкции с преградами;
- циклическая знакопеременная горизонтальная нагрузка, имитирующая идеализированное сейсмическое воздействие;
- ударные нагрузки, включающие локальное динамическое воздействие от разгрузки, повреждения от неупругого удара, взаимодействие с взрывной волной, комбинированные ударные воздействия;
- статическая разрушающая нагрузка при простых деформациях и сложном сопротивлении.

Динамические испытания на локальные повреждения опор

Экспозиция некоторых схем лабораторных стендов и объектов, на которых изучалось локальное повреждение опор, приведена на рис. 1–7.

Дадим краткое описание этих экспериментальных работ.

В статье [7] рассматривается сопротивляемость модели трехмерной пластинчато-стержневой конструкции (несущий стальной каркас и перекрытие) запроектному воздействию в виде удаления колонны. Перекрытие выполнено бетонным с внешним армированием сплошным стальным листом и соединено сваркой со стержневой системой каркаса. В ходе эксперимента измерялись деформации и перемещения. Для анализа перераспределения силовых потоков напряженно-деформированное состояние каждого конструктивного элемента исследовалось дополнительно. Система была доведена до исчерпания несущей способности с образованием зон локальных разрушений плиты и пластических шарниров в стержнях.

В статьях [8; 9] исследовался эффект общей сопротивляемости многопролетных пространственных рам зданий воздействию в виде удаления средней колонны. В работе [10] ставились эксперименты по анализу живучести рам при различных конструкциях болтовых стыков. В эксперименте [11] исследуется сопротивляемость прогрессирующему разрушению двухпролетной рамы повышенной живучести, оборудованной страховочными тязями. Экспериментальным путем для данной конструкции был определен коэффициент конструкционного демпфирования по Релею. Смежным направлением этих исследований является учет взаимодействия поврежденной конструкции с неразрушаемой преградой [12]. Такой тип воздействий является характерным для ряда аварийных ситуаций на объектах строительства. Целью данных экспериментальных исследований являлась проверка точности методик расчета повреждаемых систем на этот тип нагружения.

Работы [13–18] посвящены удалению колонны образца в виде композитной рамы с ригелями, состоящими из стальных прокатных профилей и жестко соединенной с ними железобетонной плиты. Стыки ригелей с колоннами осуществлялись болтовым соединением. В работе [13] исследовался эффект от усиления узловых соединений подкрепляющими пластинками. Выявлено, что рамы хорошо сопротивляются таким воздействиям, определены рациональные углы установки пла-

стинок, позволяющие более эффективно распределять силовые потоки при динамических догружениях.

В статье [19] рассматривается экспериментальное моделирование напряженно-деформированного состояния фрагмента шестиэтажного здания при удалении колонны. Колонна удаляется с помощью механического актуатора, сдвигающего колонну. Узловые соединения выполнены на болтах, соединяющих фланцы балок и пояса колонн. Установлен характер изменения вертикальных перемещений во времени и характер деформирования балок и узловых соединений. Выяснено, что болтовые соединения при заданном виде воздействий позволяют эффективно распределять силовые потоки и не допускать прогрессирующего разрушения.

В работах [20–22] исследуются неразрезные стальные балки при удалении одной из опор. Оценивается эффект динамического догружения в зависимости от уровня напряженно-деформированного состояния конструкции. При этом удаление опор моделируется не обычным механическим способом, а с помощью электромагнита.

Особого внимания заслуживают эксперименты на реальных сооружениях и стальных рамах в составе их каркасов [23–27]. Так, в работе [23] исследовался процесс деформирования реального здания, подлежащего сносу, при последовательном удалении до 4-х крайних колонн поперечной рамы здания. Измерялись перемещения и нагруженность стержней. При этом для оценки уровня напряженного состояния вычислялся коэффициент $K = M_{\max}/M_p \leq 1$, где M_p – момент, при котором в сечении стальной рамы образуется пластический шарнир. С помощью выполненных экспериментов проверялась корректность использования двумерных и трехмерных моделей для конечно-элементных расчетов пространственных объектов при быстром удалении стоек из расчетной схемы. Показывается, что для удаления крайних колонн как двумерные, так и трехмерные модели при сравнении с экспериментальными данными дают удовлетворительные результаты.

В работе [28] исследуется несущая способность рамных тонкостенных стальных конструкций при просадках грунтового основания. Во всех рассматриваемых системах сбор экспериментальных данных выполняется с помощью современных промышленных систем сбора данных, основанных на применении крейтов с аналогово-цифровыми преобразователями, универсальных многоканальных модулей, соединенных с линейными стержневыми, тросовыми или лазерными датчиками перемещений. Измерялись преимущественно

перемещения и деформации во времени для перебранных систем. В результате проведения такого рода исследований были выявлены характерные закономерности динамического поведения стальных рам при удалении одной или нескольких стоек.

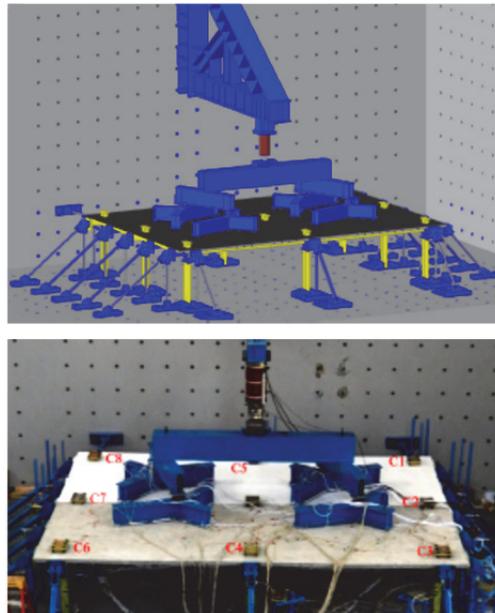


Рис. 1. Удаление средней колонны пространственной рамной системы с композитным перекрытием [Fig. 1. Removing the middle column of a spatial frame system with a composite overlap] [7]



Рис. 2. Локальное повреждение поперечной рамы повышенной живучести [Fig. 2. Local damage to the transverse frame of increased survivability] [11]



Рис. 3. Выключение опоры в раме, взаимодействующей с преградой [Fig. 3. Disconnection of the support in the frame, interacting with balk] [12]

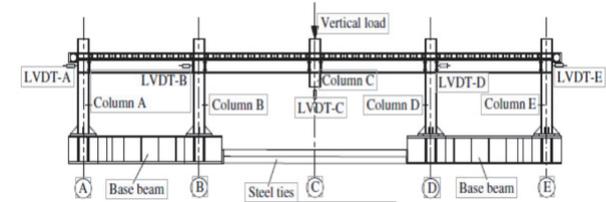
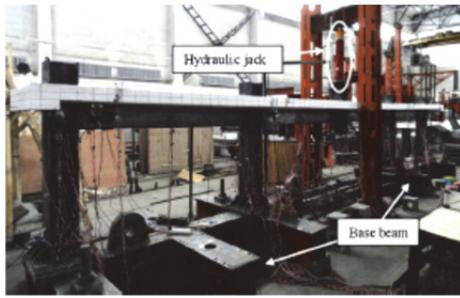


Рис. 4. Удаление средней колонны плоской рамной системы [Fig. 4. Removing the middle column of a flat frame system] [13]



Рис. 5. Последовательное удаление колонн в здании [Fig. 5. Consecutive removal of columns in the building] [23]

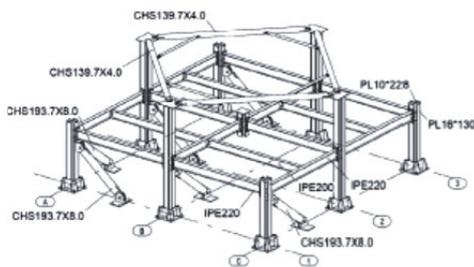


Рис. 6. Выключение средней опоры в ячейке здания [Fig. 6. The disconnection of support in the middle of the building cell] [19]

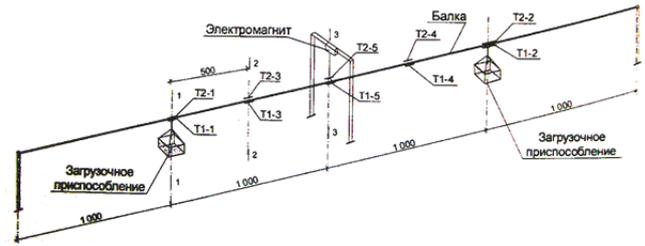


Рис. 7. Выключение опоры в П-образной раме [Fig. 7. Disconnection of the support in a U-shaped frame] [20]

Испытания на квазисейсмические воздействия

Испытания конструкций на циклическую горизонтальную нагрузку изображены на рис. 8–10. Приведем краткое описание таких экспериментов.

В статье [29] экспериментально исследовался сдвиг пластинок, опертых по двум сторонам при динамических нагружениях, в виде циклически повторяющихся горизонтальных силовых воздействий, аналогичных идеализированным сейсмическим. Измерялись деформации во времени для сплошных и перфорированных образцов различной толщины. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании балок со сплошной и перфорированной стенкой в зданиях, расположенных в сейсмически опасных районах.

В работах [30–32] рассматривается поведение пластин, подкрепленных стержнями при сейсмических нагрузках. Статья [33] посвящена исследованию сопротивления боковой циклической нагрузке рамной конструкции с тонкостенными пластинами, работающими на сдвиг. Также испытывались на сейсмические воздействия и тонкостенные стержневые системы [34–37]. На лабораторных образцах [34] исследовалась несущая способность при кручении тонкостенных профилей различных сечений при периодически повторяющихся горизонтальных нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия. Исследовалось влияние постановки ребер жесткости на силовое сопротивление стержня. В результате установлено, что при таких воздействиях постановка ребер жесткости по длине профиля не всегда приводит к увеличению прочности образцов.

Работы [35–37] посвящены испытаниям рамных тонкостенных элементов и рам в целом, при этом для исследователей особый интерес представляет диссипация энергии при деформациях таких систем.

Отдельно на сейсмические воздействия исследуются узловые соединения [38–40]. В этих работах уделяется внимание узлам, состоящим из стальных сварных конструкций, усиленных железобетоном. В статье [38] испытывался узел сопряжения

стальной балки и колонны, усиленной железобетонной облоймой. При этом соединения колонны с балкой – сварные через сплошную соединительную пластину, проходящую в теле колонны. Узел доводился до разрушения. Приведены зависимости деформаций опасных точек во времени. Цель эксперимента – опытная проверка применимости такого типа узловое соединения для повышения сопротивляемости здания сейсмическим воздействиям.



Рис. 8. Испытания стальной пластины [Fig. 8. Testing of a steel plate for shear in its plane] [29]

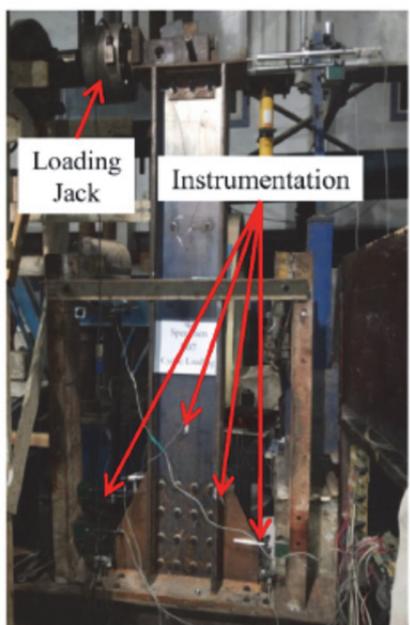


Рис. 9. Испытания колонны из ЛСТК [Fig. 9. Tests of a light steel thin-walled column profile] [34]

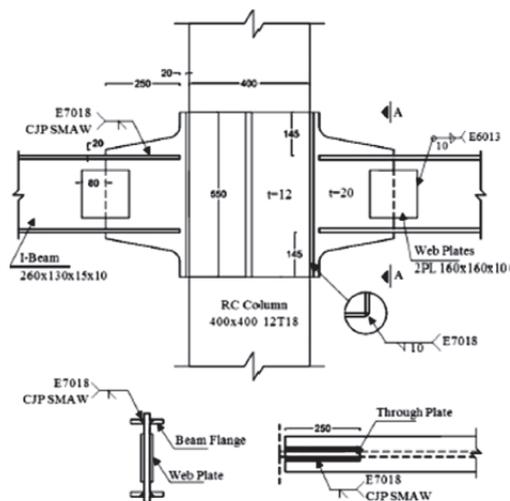
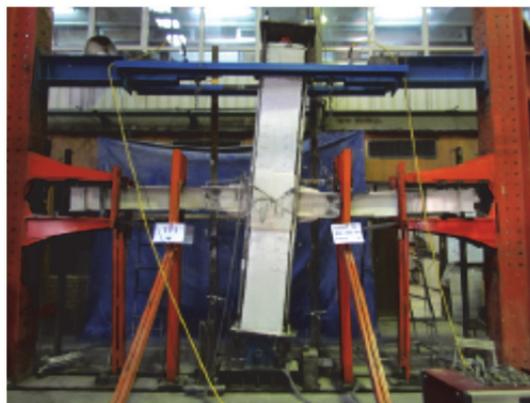


Рис. 10. Разрушающие испытания сварного фланцевого узла опирания балок [Fig. 10. Destructive testing of a welded flange support unit for beams] [38]

Исследования предельной статической нагруженности

На рис. 11–14 представлены эксперименты по определению предельной статической нагрузки на балки при их сложном сопротивлении и пространственную раму.



Рис. 11. Косой изгиб трубчатых стержней [Fig. 11. Skew bending of tubular bars] [41]



Рис. 12. Изгиб с кручением трубчатых стержней [Fig. 12. Bending with torsion of tubular bars][41]



Рис. 13. Поперечный изгиб двутавровых балок [Fig. 13. Transverse bending of I-beams] [42]



Рис. 14. Предельное нагружение пространственных рам [Fig. 14. Limit loading of spatial frames] [43]

В экспериментах [41–43] исследовалось деформирование стержней при сложном сопротивлении. В результате установлено, что механизм разрушения исследуемых систем аналогичен схеме образования пластического шарнира при плоском изгибе. Эксперименты [42; 43] выполнялись с целью верификации методики расчета, основанной на схеме эволюционного моделирования с ограничениями статической теоремы метода предельного равновесия. Эти исследования подтвердили, что пространственные стальные рамы при достижении ими предельной несущей способности имеют схемы локальных разрушений в виде системы пространственных пластических шарниров. При этом

деформируемая система обладает свойством живучести до тех пор, пока не произойдет переход в состояние, соответствующее образованию механизма, что отмечалось ранее для железобетонных конструкций.

Комбинированные ударные и взрывные воздействия

На рис. 15–18 представлены некоторые исследования на ударные и взрывные воздействия.

В работе [44] изучен характер изменения несущей способности образцов трубчатых колонн при локальном повреждении ударным воздействием. Удар наносился перпендикулярно продольной оси трубы. Воздействие приводило к незначительному локальному смятию части стенки. Далее образец испытывался на сжатие до потери устойчивости. Установлено, что такие воздействия приводят к потере несущей способности более чем на 40%, при этом большая несущая способность наблюдается у образцов большей толщины.

Экспериментально исследуется на сопротивление взрыву защитная сэндвич-панель [45], состоящая из двусторонней стальной обшивки и алюминиевых гнутых листов, образующих при соединении друг с другом структуру, аналогичную ячейкам пчелиных сот. Такая панель обладает существенной сопротивляемостью взрыву по сравнению со сплошной панелью. Цель эксперимента – разработка и верификация пластинчатых защитных панелей для повышения устойчивости зданий к террористическим актам, связанным со взрывами самодельных устройств.

Кроме того, исследуется стойкость взрывозащитных сэндвич-панелей при контакте с жидкими взрывчатыми веществами [46] и с воздушной взрывной волной [47; 48]. На воздействие взрывом испытывались также трубобетонные колонны [49].



Рис. 15. Ударные воздействия на раму [Fig. 15. Shock impacts on the frame] [50]



Рис. 16. Испытание фермы в составе каркаса здания на локальную динамическую разгрузку
[Fig. 16. Testing the truss as part of the building frame for local dynamic unloading] [51]

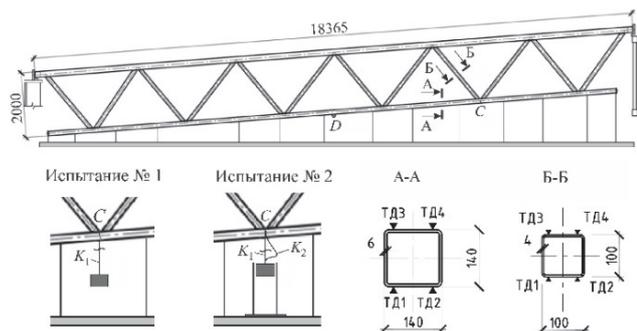


Рис. 17. Схемы испытаний
[Fig. 17. Testing schemes] [51]

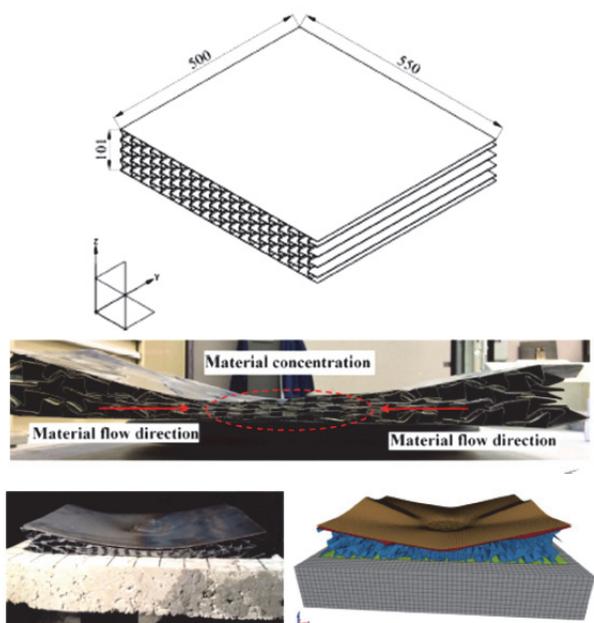


Рис. 18. Испытание защитной панели на взрыв от самодельного заряда
[Fig. 18. Testing the protective panel for an explosion under a self-made charge] [45]

Эксперименты [50] и [51] посвящены исследованиям динамики конструкций при ударных воздействиях. Пространственная рама из испытания [50] подвергалась серии неупругих ударов массивным телом, свободно падающим с различных высот. При этом фиксировалась динамическая ре-

акция на ударное воздействие. В результате установлено, что для пространственных рам значения максимальной амплитуды наблюдаемых характеристик достигаются в первой четверти периода основной частоты колебаний системы. Объектом для испытания [51] являлась стропильная ферма пролетом 18 м, установленная в каркасе промышленного здания. Эта ферма подвергалась исследованию при ненормируемом ударном воздействии, которое включало динамическую разгрузку фермы при моделировании обрыва подвеса K_1 (см. рис. 17) вентиляционно-охладительного комплекса (ВОК), закрепленного в нижний узел фермы. При этом падение груза в цех предотвращалось страховочными канатами, связывающими груз (модель ВОК) и две соседних фермы, расположенные по разным сторонам от испытываемой конструкции. В результате была определена максимальная масса ВОК, который можно разместить на ферме при обеспечении недопущения появления значительных пластических деформаций в случае возникновения такого рода запроектных воздействий. В качестве другого воздействия на конструкцию рассматривался обрыв троса ВОК, сопровождающийся ударом по страховочной траверсе, закрепляемой в нижний узел фермы. Такое воздействие моделировалось введением двух канатов K_1 и K_2 (см. рис. 17). После разрыва каната K_1 с грузом последний совершает свободное падение и передает ударный импульс с помощью каната K_2 в узел нижнего пояса фермы.

Вывод. Оценка степени силового сопротивления стальных конструкций аварийным воздействиям, в том числе их живучести, наиболее достоверно может быть выполнена при верификационных экспериментальных исследованиях, моделирующих эти воздействия. Необходимо расширять область нормирования запроектных воздействий на стальные конструкции с целью более всесторонней оценки безопасности объектов при возникновении различных аварийных ситуаций. Основываясь на результатах обзора, можно отметить, что мало внимания уделяется экспериментальным исследованиям, включающим локальные разрушения узлов соединения стальных балок с колоннами при запроектных воздействиях, а также напряженно-деформированному состоянию рамных систем при локальных просадках грунта.

© Алексейцев А.В., Курченко Н.С., 2018

Благодарности

Авторы сердечно благодарят почетного работника науки и техники Российской Федерации, заслуженного ученого Брянской области, руководителя научной школы «Повышение прочности, конструктивной безопас-

ности, виброзащитности и срока службы строительных систем и машиностроительной продукции», заведующего кафедрой механики Брянского государственного инженерно-технологического университета доктора технических наук, профессора Игоря Нафтольевича Серпика за доброжелательное отношение и помощь в научных исследованиях.

Список литературы

1. Бондаренко В.М., Клюева Н.В., Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Некоторые результаты анализа и обобщения научных исследований по теории конструктивной безопасности и живучести // Строительство и реконструкция. 2012. № 4. С. 3–14.
2. Колчунов В.И. Основные направления развития конструктивных решений и обеспечение безопасности жилища // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 10. С. 12–15.
3. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 2. С. 77–83.
4. Кривошапко С.Н. Виды аварий и разрушений пространственных структур и оболочек // Строительство и реконструкция. 2015. № 1. С. 22–32.
5. Клюева Н.В., Ветрова О.А. Экспериментально-теоретические исследования живучести эксплуатируемых железобетонных рам при внезапных повреждениях // Бетон и железобетон. 2006. № 6. С. 12–15.
6. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Колчина Т.О. К анализу экспериментально-теоретических исследований живучести коррозионно-повреждаемых железобетонных балочных систем с разрушением по наклонному сечению // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 69–72.
7. Fu Q.N., Tan K.H., Zhou X. H. et. all. Load-resisting mechanisms of 3D composite floor systems under internal column-removal scenario // Engineering structures. 2017. № 148. Pp. 357–372.
8. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Part I. Simplified assessment framework // Engineering structures. 2008. № 30 (5). Pp. 1308–1318.
9. Li H., El-Tawil S. Three-dimensional effects and collapse resistance mechanisms in steel frame buildings // Journal of Structural Engineering. 2014. 140: A4014017.
10. Yang B., Tan K.H. Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario // Engineering Structures. 2013. № 54. Pp. 112–130.
11. Алексейцев А.В., Сертик И.Н. Экспериментально-теоретический анализ запроектного воздействия на стальную раму со страховочными тяжами // Строительство и реконструкция. 2015. № 1. С. 3–10.
12. Сертик И.Н., Алексейцев А.В. Оценка нагруженности повреждаемых стальных рам с учетом ударного взаимодействия с внешними преградами // Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах: матер. 3-й Междугунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2013. Т. 1. С. 375–378.
13. Lanhui G., Shan G., Feng F. Structural performance of semi-rigid composite frame under column loss // Engineering structures. № 95. Pp. 112–126.
14. Li L., Wang W., Chen Y.Y., Lu Y. Experimental investigation of beam-to-tubular column moment connections under column removal scenario // Journal of Constructional Steel Research. 2013. № 88. Pp. 244–255.
15. Guo L.H., Gao S., Fu F., Wang Y.Y. Experimental study and numerical analysis of progressive collapse resistance of composite frames // Journal of Construction Steel Research. 2013. № 89. Pp. 236–251.
16. Dinu F., Dubina D., Marginean I., Neagu C., Petran I. Structural connections of steel building frames under extreme loading // Advanced Material Research. 2015. Vol. 1111. Pp. 223–228.
17. Demonceau J.F., Jaspert J.P. Experimental test simulating a column loss in a composite frame // Advanced Steel Construction. 2010. Vol. 6. No 3. Pp. 891–913.
18. Kuhlmann U., Roelle L., Izzuddin B. Resistance and Response of Steel and Steel-Concrete Composite Structures in Progressive Collapse Assessment // Structural Engineering International. 2012. Vol. 22. Pp. 86–92.
19. Florea D., Ioan M., Dan D. Experimental testing and numerical analysis of 3D steel frame system under column loss // Engineering structures. 2016. Vol. 113. Pp. 59–70.
20. Меднов Е.А. Оценка динамических усилий в элементах металлоконструкций при внезапном запроектном воздействии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. М., 2011. 23 с.
21. Федоров В.С., Меднов Е.А. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагружения на возникающий динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках // Строительство и реконструкция. 2010. № 6. С. 48–52.
22. Федоров В.С., Меднов А.Е., Меднов Е.А. К расчету динамических догрузений в неразрезных балках // Вестник РААСН. 2011. № 15. С. 162–166.
23. Song B.I., Giriunas K.A., Sezen H. Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building // Journal of constructional steel research. 2014. Vol. 94. Pp. 76–83.
24. Ortiz J.A., Hernandez L.A., Hernandez M. et al. Full-scale experimental and numerical study about structural behaviour of a thin-walled cold-formed steel building affected by ground settlements due to land subsidence // Prevention and Mitigation of Natural and Anthropogenic Hazards due to Land Subsidence: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Nagoya, Japan, 2015. Vol. 372. Pp. 141–144.
25. Janssens V.M., O'Dwyer D.W. Disproportionate Collapse in Building Structures. Joint Symposium on Bridge and Infrastructure Research in Ireland (BRI 10) and Concrete Research in Ireland (CRI 10). Cork, Ireland, 2010.
26. Song B.I., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building // Engineering structures. 2013. Vol. 56. Pp. 664–672.
27. Song B.I., Sezen H., Giriunas K. Experimental and analytical assessment on progressive collapse potential of

actual steel frame buildings. ASCE Structures Conference and North American Steel Construction Conference, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, 2010.

28. *Hernandez-Castillo L.A., Ortiz-Lozano J.A., Hernandez-Marin M.* et al. Fragility curves for thin-walled cold-formed steel wall frames affected by ground settlements due to land subsidence // *Thin-walled structures*. 2015. Vol. 87. Pp. 66–75.

29. *Shekastehband B., Azaraxsh A.A., Showkati H.* et al. Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations // *Engineering structures*. 2017. Vol. 135. Pp. 161–176.

30. *Guo L., Rong Q., Ma X., Zhang S.* Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only // *International Journal of Steel Structures*. 2011. № 11 (4). Pp. 467–479.

31. *Kurata M., Leon R.T., Roches R., Nakashima M.* Steel plate shear wall with tension-bracing for seismic rehabilitation of steel frames // *Journal of constructional steel research*. 2012. Vol. 71. Pp. 92–103.

32. *Clayton P.M., Berman J.W., Lowes L.N.* Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates // *Journal of constructional steel research*. 2015. Vol. 106. Pp. 198–208.

33. *Dubina D., Dinu F.* Experimental evaluation of dual frame structures with thin-walled steel panels // *Thin-walled structures*. 2014. Vol. 78. Pp. 57–69.

34. *Serror M.H., Hassan E.M., Mourad S.A.* Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams // *Journal of constructional steel research*. 2016. Vol. 121. Pp. 216–228.

35. *Bagheri S.A., Petkovski M.K., Mirghaderi P.R.* Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings // *Engineering structures*. 2012. Vol. 42. Pp. 371–386.

36. *Padilla-Llano D., Moen C.D., Eatherton M.R.* Cyclic axial response and energy dissipation of cold-formed steel framing members // *Thin-walled structures*. 2014. Vol. 78. Pp. 95–107.

37. *Hassan E.M., Serror M.H., Mourad S.A.* Behavior of cold-formed steel in moment-resisting frames // *Materials of Scientific Thesis at Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University*, 2016.

38. *Eghbali N.B., Mirghaderi S.R.* Experimental investigation of steel beam to RC column connection via a through-plate // *Journal of constructional steel research*. 2017. Vol. 133. Pp. 125–140.

39. *Mirghaderi S.R., Eghbali N.B.* Analytical investigation of a new Through Column-Type Joint for composite reinforced concrete and steel frames // *The World Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, Jeju, Korea, September 2013.

40. *Mirghaderi S.R., Eghbali N.B., Ahmadi M.M.* Moment-connection between continuous steel beams and reinforced concrete column under cyclic loading // *Journal of constructional steel research*. 2016. Vol. 118. Pp. 105–119.

41. *Серпник И.Н., Алексейцев А.В., Гусаков А.И.* Экспериментально-теоретические исследования образования пластических шарниров в стержнях замкнутого тонкостенного сечения при сложном сопротивлении //

Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 67-й Всероссийской науч.-техн. конф. Самара: СГАСУ, 2010. С. 131–133.

42. *Парфенов С.Г., Алексейцев А.В.* Моделирование нелинейного деформирования стальных балок и рам и оценка их предельной несущей способности // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. Вып. 18. Москва, 2014. С. 60–64.

43. *Серпник И.Н., Алексейцев А.В.* Экспериментальные исследования несущей способности пространственных металлических рам // *Вестник МГСУ*. 2012. № 5. С. 40–44.

44. *Jun W., Yu C., Kai W.* Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact // *Thin-walled structures*. 2017. Vol. 118. Pp. 23–36.

45. *Qi C., Remennikov A., Pei L.-Z.* Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations // *Composite structures*. 2017. Vol. 180. Pp. 161–178.

46. *Remennikov A.* Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges // *International journal of impact engineering*. 2017. Vol. 101. Pp. 78–89.

47. *Nurick G.N.* Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast. Part 1. Experiments // *Composite Structures*. 2009. № 91 (4). Pp. 433–441.

48. *Santosa S.P., Arifurrahman F., Izzudin M.H.* Response Analysis of Blast Impact Loading of Metal-Foam Sandwich Panels // *11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics (IMPLAST): Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. Pp. 495–502.

49. *Wang H.* Experimental study of large-sized concrete filled steel tube columns under blast load // *Construction and building materials*. 2017. Vol. 134. Pp. 131–141.

50. *Серпник И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В.* Экспериментальное исследование деформаций стальной рамы при ударном нагружении // *Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции*. Чебоксары: Изд-во Чуваши. ун-та, 2014. С. 317–321.

51. *Алексейцев А.В., Курченко Н.С.* Деформации стальных стропильных ферм при ударных аварийных воздействиях // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 5. С. 3–13.

References

1. Bondarenko V.M., Klyuyeva N.V., Kolchunov V.I. (2012). Some results of analysis and generalization of scientific research on the theory of constructive safety and survivability. *Construction and reconstruction*, (4), 3–14. (In Russ.)

2. Kolchunov V.I. (2007). The basic directions of development of constructive decisions and maintenance of safety of dwelling. *Industrial and civil construction*, (10), 12–15. (In Russ.)

3. Tamrazyan A.G. (2011). Recommendations to the development of requirements for the survivability of buildings and structures. *Bulletin of MGSU*, 1(2), 77–83. (In Russ.)

4. Krivoshapko S.N. (2015). Types of accidents and destruction of spatial structures and shells. *Building and reconstruction*, (1), 22–32. (In Russ.)
5. Klyueva N.V., Vetrov O.A. (2006). Experimental-theoretical studies of the survivability of exploited reinforced concrete frames in case of sudden damage. *Concrete and reinforced concrete*, (6), 12–15. (In Russ.)
6. Kolchunov V.I., Androsova N.B., Kolchina T.O. (2012). To the analysis of experimental and theoretical studies on the livability of corrosion-damaged reinforced concrete beam systems with fracture along an inclined cross section. *Industrial and civil construction*, (12), 69–72. (In Russ.)
7. Fu Q.N., Tan K.H., Zhou X.H. (2017). Load-resisting mechanisms of 3D composite floor systems under internal column-removal scenario. *Engineering structures*, (148), 357–372.
8. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Part I. Simplified assessment framework. *Engineering structures*, 30(5), 1308–1318.
9. Li H., El-Tawil S. (2014). Three-dimensional effects and collapse resistance mechanisms in steel frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 140:A4014017.
10. Yang B. (2013). Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario. *Engineering Structures*, (54), 112–130.
11. Alekseytsev A.V., Serpik I.N. (2015). Experimental-theoretical analysis of the beyond design effect on a steel frame with safety belts. *Construction and Reconstruction*, (1), 3–10. (In Russ.)
12. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. (2013). Assessment of the loading of damaged steel frames with allowance for impact interaction with external obstacles. *Problems of innovative biosphere-compatible socio-economic development in the construction, housing and communal and road complexes*. Mater. 3rd Intern. scientific-practical. conf. Bryansk, 1, 375–378. (In Russ.)
13. Lanhui G., Shan G., Feng F. (2011). Structural performance of semi-rigid composite frame under column loss. *Engineering structures*, (95), 112–126.
14. Li L., Wang W., Chen Y.Y., Lu Y. (2013). Experimental investigation of beam-to-tubular column moment connections under column removal scenario. *Journal of Constructional Steel Research*, (88), 244–255.
15. Guo L.H., Gao S., Fu F., Wang Y.Y. (2013). Experimental study and numerical analysis of progressive collapse resistance of composite frames. *Journal of Construction Steel Research*, (89), 236–251.
16. Dinu F., Dubina D., Marginean I., Neagu C., Petran I. (2015). Structural connections of steel building frames under extreme loading. *Advanced Material Research*, 1111, 223–228.
17. Demonceau J.F., Jaspert J.P. (2010). Experimental test simulating a column loss in a composite frame. *Advanced Steel Construction*, 6(3), 891–913.
18. Kuhlmann U., Roelle L., Izzuddin B. (2012). Resistance and Response of Steel and Steel-Concrete Composite Structures in Progressive Collapse Assessment. *Structural Engineering International*, 22, 86–92.
19. Florea D., Ioan M., Dan D. (2016). Experimental testing and numerical analysis of 3D steel frame system under column loss. *Engineering structures*, 113, 59–70.
20. Mednov E.A. (2011). *Otsenka dinamicheskikh usilii v elementakh metallokonstruktsiy pri vnezapnom zaproyektnom vozdeystvii* [Evaluation of dynamic forces in the elements of metal structures with sudden emergency action] (PhD Dissertation). Moscow, Russia. (In Russ.)
21. Fedorov V.S., Mednov E.A. (2010). Influence of the initial stress-strain state and the loading level on the emerging dynamic effect in the case of emergency failure of a support in continuous steel beams. *Construction and Reconstruction*, (6), 48–52. (In Russ.)
22. Fedorov V.S., Mednov A.E., Mednov E.A. (2011). To the calculation of dynamic immersions in continuous beams. *The Bulletin of the Russian Academy of Construction Sciences*, (15), 162–166. (In Russ.)
23. Song B.I., Giriunas K.A., Sezen H. (2014). Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building. *Journal of constructional steel research*, 94, 76–83.
24. Ortiz J.A., Hernandez L.A., Hernandez M. (2015). Full-scale experimental and numerical study about structural behaviour of a thin-walled cold-formed steel building affected by ground settlements due to land subsidence. *Prevention and Mitigation of Natural and Anthropogenic Hazards due to Land Subsidence*. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Nagoya, Japan, 372, 141–144.
25. Janssens V.M., O'Dwyer D.W. (2010) Disproportionate Collapse in Building Structures. *Joint Symposium on Bridge and Infrastructure Research in Ireland (BRI 10) and Concrete Research in Ireland (CRI 10)*. Cork, Ireland, 2010.
26. Song B.I., Sezen H. (2013). Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering structures*, 56, 664–672.
27. Song B.I., Sezen H., Giriunas K. (2010). *Experimental and analytical assessment on progressive collapse potential of actual steel frame buildings*. ASCE Structures Conference and North American Steel Construction Conference, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, 2010.
28. Hernandez-Castillo L.A., Ortiz-Lozano J.A., Hernandez-Marin M. (2015). Fragility curves for thin-walled cold-formed steel wall frames affected by ground settlements due to land subsidence. *Thin-walled structures*, 87, 66–75.
29. Shekastehband B., Azaraxsh A.A., Showkati H. (2017). Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations. *Engineering structures*, 135, 161–176.
30. Guo L., Rong Q., Ma X., Zhang S. (2011). Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only. *International Journal of Steel Structures*, 11(4), 467–479.
31. Kurata M., Leon R.T., Roches R., Nakashima M. (2012). Steel plate shear wall with tension-bracing for seismic rehabilitation of steel frames. *Journal of constructional steel research*, 71, 92–103.
32. Clayton P.M., Berman J.W., Lowes L.N. (2015). Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates. *Journal of constructional steel research*, 106, 198–208.
33. Dubina D., Dinu F. (2014). Experimental evaluation of dual frame structures with thin-walled steel panels. *Thin-walled structures*, 78, 57–69.

34. Serror M.H., Hassan E.M., Mourad S.A. (2016). Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of constructional steel research*, 121, 216–228.
35. Bagheri S.A., Petkovski M.K., Mirghaderi P.R. (2012). Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings. *Engineering structures*, 42, 371–386.
36. Padilla-Llano D., Moen C.D., Eatherton M.R. (2014). Cyclic axial response and energy dissipation of cold-formed steel framing members. *Thin-walled structures*, 78, 95–107.
37. Hassan E.M., Serror M.H., Mourad S.A. (2016). *Behavior of cold-formed steel in moment-resisting frames*. Materials of Scientific thesis at Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University, 2016.
38. Eghbali N.B., Mirghaderi S.R. (2017). Experimental investigation of steel beam to RC column connection via a through-plate. *Journal of constructional steel research*, 133, 125–140.
39. Mirghaderi S.R., Eghbali N.B. (2013). *Analytical investigation of a new Through Column-Type Joint for composite reinforced concrete and steel frames*. The World Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13), Jeju, Korea, September 2013.
40. Mirghaderi S.R., Eghbali N.B., Ahmadi M.M. (2016). Moment-connection between continuous steel beams and reinforced concrete column under cyclic loading. *Journal of constructional steel research*, 118, 105–119.
41. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Gusakov A.N. (2010). Experimental and theoretical studies of the formation of plastic hinges in rods of a closed thin-walled section under complex resistance. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture*. Materials of the 67th All-Russian Scientific and Technical University Conf. Samara: SSUABCE, 131–133. (In Russ.)
42. Parfenov S.G., Alekseyev A.V. (2014). Modeling of non-linear deformation of steel beams and frames and estimation of their ultimate load-bearing capacity. *Bulletin of the Department of Building Sciences of RAASN*. Moscow, (18), 60–64.
43. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. (2012). Experimental studies of the load-bearing capacity of spacer metal frames. *Bulletin of MGSU*, (5), 40–44. (In Russ.)
44. Jun W., Yu C., Kai W. (2017). Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact. *Thin-walled structures*, 118, 23–36.
45. Qi C., Remennikov A., Pei L.Z. (2017). Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations. *Composite structures*, 180, 161–178.
46. Remennikov A. (2017). Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. *International journal of impact engineering*, 101, 78–89.
47. Nurick G.N. (2009). Behavior of sandwich panels subjected to intense air blast. Part 1. Experiments. *Composite Structures*, 91(4), 433–441.
48. Santosa S.P., Arifurrahman F., Izzudin M.H. (2017). Response Analysis of Blast Impact Loading of Metal-Foam Sandwich Panels. *Procedia Engineering*. 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics (IMPLAST), 173, 495–502.
49. Wang H. (2017). Experimental study of large-sized concrete filled steel tube columns under blast load. *Construction and building materials*, 134, 131–141.
50. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V. (2014). Experimental study of steel frame deformations under impact loading. *New in Architecture, Design of Building Structures and Reconstruction*. Materials of the VIII All-Russian (II International) Conference. Cheboksary: Publishing house Chuvash. Univ., 317–321. (In Russ.)
51. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. (2017). Deformations of steel trusses under emergency action. *Magazine of Civil Engineering*, 5(73), 3–13.

Об авторах

Алексейцев Анатолий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». *Область научных интересов:* строительные конструкции, строительная механика. *Контактная информация:* e-mail – aalexw@mail.ru.

Курченко Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства, Брянский государственный инженерно-технологический университет. *Область научных интересов:* строительные конструкции, организация строительства. *Контактная информация:* e-mail – ms.kurchenko@mail.ru.

About the authors

Alekseytsev Anatoly – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Engineering, Institute of Construction and Architecture, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). *Scientific interests:* building constructions, structural mechanics. *Contact:* e-mail – aalexw@mail.ru. Scopus ID: 57191530761. ORCID: 0000-0002-4765-5819. E-library SPIN: 3035-5571.

Kurchenko Natalya – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Production, Institute of Construction, Bryansk State University of Engineering and Technology. *Scientific interests:* building constructions, organization and planning of construction. *Contact:* e-mail – ms.kurchenko@mail.ru. Scopus ID: 57196073119. E-library SPIN: 6641-1733.

Для цитирования

Алексейцев А.В., Курченко Н.С. Обзор методов и результатов экспериментальных исследований стальных и сталебетонных конструкций при особых воздействиях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 3. С. 205–215. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-205-215.

For citation

Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. (2018). Review of methods and results of experimental investigations of steel and steel concrete structures under special impact. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(3), 205–215. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-205-215.