УДК 624.014

© О. А. Туснина, канд. техн. наук, доцент
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет)
E-mail: tusninaOA@mgsu.ru
© С. А. Павлов, канд. техн. наук, исполн. директор
(ООО «ЦНИИ «ПроектСтальКонструкция»»)
E-mail: pavlov.st.a@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-114-122

© O. A. Tushina, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University))
E-mail: tusninaOA@mgsu.ru
© S. A. Pavlov, PhD in Sci. Tech., Executive Director
(LLC Central Research Institute
«Steel Construction Design»)
E-mail: pavlov.st.a@gmail.com

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ КАРКАСА КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА

EVALUATION OF RESISTANCE TO THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF THE CONVERTER SHOP FRAME

Описаны результаты анализа устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конвертерного цеха. Конвертерный цех является особо опасным производственным объектом, и в соответствии с отечественными нормативными документами для такого сооружения должен выполняться расчет на прогрессирующее обрушение. Были проанализированы аварийные ситуации, которые могут возникнуть с учетом особенностей технологии производства, а также рассмотрены локальные разрушения несущих конструкций цеха. По результатам выполненных расчетов установлено, что каркас конвертерного цеха обладает хорошей живучестью: ни при одном варианте аварийных ситуаций лавинообразное разрушение сооружения не происходит.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, аварийная ситуация, надежность, стальной каркас, конвертерный цех, действующее производство.

The article presents the results of the analysis of resistance of the converter shop framework to the progressive collapse. The converter shop is a particularly hazardous production facility, and in accordance with the national regulatory documents, a calculation for progressive collapse must be performed for such a structure. Emergency situations that may arise taking into account the features of the production technology have been analyzed, and local damage to the supporting structures of the workshop has been taken into consideration. According to the results of the calculation analysis, it has been found out that the converter shop framework has a good survivability — the avalanche-like collapse of the structure will never occur in any case of emergency situation.

Keywords: progressive collapse, emergency situation, reliability, steel frame, converter shop, existing production.

Прогрессирующее обрушение сооружения может произойти вследствие локального разрушения несущих конструкций, которое повлечет за собой разрушение других конструкций, а как следствие — и полное обрушение здания или сооружения.

В отечественной нормативной литературе принято следующее определение прогрессирующего обрушения — это последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения.

Причинами начального локального разрушения конструкций могут являться воздействие огня или повышенной температуры, взрывы технологического оборудования, взрывы бытового газа или взрывы, происходящие из-за нарушений технологического процесса, террористические акты, удары транспортных средств, ошибки проектирования и монтажа, износ конструкций вследствие усталости, коррозии и т. д. [1]. Все эти воздействия на каркас сооружения не являются эксплуатационными, а представляют собой нештатные аварийные ситуации.

В настоящее время проблемой анализа устойчивости сооружений к прогрессирующему обрушению широко занимаются во всем мире [2–4]. Причиной повышенного внимания к обеспечению устойчивости сооружений к прогрессирующему обрушению стало лавинообразное разрушение ряда сооружений, произошедшее по причине террористических атак или иных аварийных воздействий [5] (взрыв газа в жилом 22-этажном доме в Лондоне в 1968 г.; теракт в Оклахома-Сити в 1995 г.; разрушение башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке в 2001 г.).

Много исследований зарубежных [6–9] и отечественных авторов [10–13] посвящено оценке надежности и определению живучести сооружений при аварийных воздействиях.

Ряд научных исследований посвящен анализу динамического коэффициента и влиянию скорости разрушения несущей конструкции на динамическую составляющую усилий в конструкции [14–16].

Авторами работ [17] и [18] выполнено натурное экспериментальное исследование устойчивости сооружения к прогрессирующему обрушению путем внезапного последовательного разрушения четырех несущих колонн существующего стального каркаса здания и анализа перераспределения усилий. Данные экспериментальных исследований сравнивались с результатами численных расчетов.

В отечественной практике для предотвращения прогрессирующего обрушения сооружений выполняют следующие мероприятия [19]:

- выделяют так называемые ключевые конструктивные элементы, выход из строя которых может повлечь прогрессирующее разрушение, при расчете для этих конструкций вводятся дополнительные коэффициенты условий работы;
- обеспечивают повышенные меры безопасности на объектах, исключающие или минимизирующие вероятность возникновения аварийных ситуаций. Это могут быть как режимные мероприятия, обеспечивающие охрану сооружения, так и конструктивные — защитные ограждения, футеровка несущих конструкций и т. д.;
- разрабатывают такие проектные решения, которые при возникновении аварийных ситуаций и локальных разрушений обеспечивают

перераспределение усилий в конструкциях и сохранение несущей способности и геометрической неизменяемости каркаса сооружения.

В то же время существует два подхода к обеспечению несущей способности конструкций при возникновении аварийных ситуаций и локального разрушения: не допустить прогрессирующего разрушения здания или обеспечить устойчивость сооружения в течение определенного промежутка времени до начала его прогрессирующего разрушения [20]. Второй подход в основном имеет отношение к защите зданий от пожара, когда требуется обеспечить необходимый уровень огнестойкости конструкций, выражающийся в количестве минут, в течение которых при воздействии огня конструкция должна сохранять несущую способность.

В зависимости от назначения здания или сооружения последствия его прогрессирующего обрушения могут быть очень тяжелыми: экологические катастрофы, гибель людей, материальные и экономические потери [21]. В связи с этим проектирование особо опасных производственных объектов, уникальных большепролетных и высотных сооружений, зрелищно-массовых зданий с большим скоплением людей требуется выполнять с обеспечением устойчивости каркасов таких сооружений к прогрессирующему обрушению.

В нашей стране в соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» для сооружений класса КС-3, к которым относятся здания и сооружения особо опасных и технически сложных объектов, необходимо выполнять расчет на прогрессирующее обрушение.

Также в настоящее время требуется выполнение научно-технического сопровождения проектирования и реконструкции объектов повышенного уровня ответственности, включающее в том числе и анализ устойчивости таких сооружений к прогрессирующему обрушению [22].

В данной статье выполнен анализ устойчивости к прогрессирующему разрушению конвертерного цеха № 2 (КЦ2) ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), построенного в 1974 году в Липецке.

Здание конвертерного цеха имеет стальной каркас. Конвертерный цех имеет сложную фор-

му размерами в плане 340×135 м, а также переменную высоту, максимальная отметка составляет +83,250 м. В соответствии с технологией производства здание в осях А–Г образовано тремя пролетами: ковшовым (24 м, оси А–Б), шлаковым (18 м, оси Б–В) и заливочным (30 м, оси В–Г). Основные технологические нагрузки на конструкции в осях А–Г создаются мостовыми кранами режима работы 8К грузоподъемностью от 125 до 400 т. По оси Г располагаются три конвертера емкостью 400 т, в этой зоне шаг колонн увеличен до 36 м и установлены подкраново-подстропильные фермы для заливочного крана грузоподъемностью 400 т. Основная рабочая площадка цеха располагается на отметке +11,500 м, по площадке перемещаются чугуновозы, доставляющие чугун к конвертеру.

В осях Г–Д на отметке +54,800 м работает фурменный кран грузоподъемностью 80 т.

В осях Д–Ж конструкции здания представляют собой многоэтажную раму, выполняющую роль этажерки сыпучих материалов, на разных уровнях которой располагаются бункеры, транспортеры и конвейеры для подачи сыпучих материалов в конвертер, весы-дозаторы, а также опорные конструкции и площадки обслуживания котла-охладителя.

Со стороны ряда Ж в осях 12–14, 16–18 и 20–22 к каркасу примыкают три блока помещений газоочистки, представляющие собой этажерку с рабочими площадками, на которых размещается оборудование газоочистки.

Также со стороны ряда Ж к зданию примыкают помещения шихтарников и здание электромашиного помещения (1ЭМП).

Пространственная устойчивость каркаса в поперечном направлении обеспечивается работой поперечной рамы, а также поперечных связей, установленных на всю высоту этажерки сыпучих материалов. В продольном направлении устойчивость обеспечивается постановкой системы вертикальных связей по колоннам.

В настоящее время выполняется реконструкция конвертерного цеха с целью модернизации производства и замены устаревшего оборудования на новое. Реконструкция выполняется в условиях действующего производства с остановкой и заменой одного из конвертеров.

Для анализа несущей способности конструкций цеха с использованием программного комплекса SCAD Office 21.1 была составлена конечно-элементная пространственная модель каркаса конвертерного цеха (рис. 1).

При расчете учитывались эксплуатационные нагрузки от действующего и нового оборудования, а также аварийные воздействия.

В процессе анализа основных технологических процессов и нагрузок были выявлены следующие возможные сценарии аварийных ситуаций в конвертерном отделении конвертерного цеха № 2:

1. Взрыв котла-охладителя. С учетом технологии производства и возможной одновременной работы только двух котлов-охладителей рассмотрены варианты аварийной нагрузки, допускающие вероятность взрыва одновременно двух котлов-охладителей.

При взрыве котла-охладителя аварийные нагрузки от повышенного положительного/отрицательного давления действуют от оборудования системы мокрой газоочистки на конструкции газоочисток цеха, а также на опорные конструкции котла-охладителя.

2. Возникновение аварийного давления в газоходах неорганизованных выбросов. Учитывая технологический процесс, аварийное давление в газоходах неорганизованных выбросов не может возникнуть одновременно со взрывами котлов-охладителей.

3. Аварийное заполнение системы мокрой газоочистки водой. При этом на конструкции цеха действуют аварийные нагрузки от скруббера на площадку газоочистки на отметке +31,200 и от квенчера на площадку газоочистки на отметке +42,000.

4. Аварийное воздействие от тележки подвижного зонта конвертера.

На отметке 22,500 в осях Г–Д установлена тележка подвижного зонта конвертера. Тележка подвижной части кессона предназначена для перемещения нижней части котла-охладителя на время ремонта конвертера в позицию, обеспечивающую доступ к горловине конвертера.

Во время работы конвертера тележка вместе с кессоном находится над конвертером, на время ремонта тележка с откатным кессоном перемещается в соседние оси.

Рис. 1. Конечно-элементная модель конвертерного цеха № 2 ПАО «НЛМК»

При нахождении тележки как в позиции при эксплуатации конвертера, так и при ремонте возможно возникновение от нее критических аварийных нагрузок, которые учитываются при расчете.

Все описанные аварийные ситуации были учтены при расчете.

Конвертерный цех является особо опасным производственным объектом, в соответствии с отечественными нормами необходимо выполнять расчет каркаса цеха на прогрессирующее обрушение.

В основу расчета на прогрессирующее обрушение положены следующие положения, учитывающие требования СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» и СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия»:

1. Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению конвертерного цеха № 2 выполнен с использованием метода конечных элементов на особые сочетания нагрузок.

2. Коэффициент сочетаний для длительных нагрузок принимается равным 1 — для основной по степени влияния длительной нагрузки; 0,95 — для всех остальных длительных нагрузок.

3. Коэффициент сочетаний для всех кратковременных нагрузок принимается равным 0,8.

4. Коэффициент надежности по нагрузке для кратковременных нагрузок принимается равным 0,5.

5. При выполнении расчета на прогрессирующее обрушение аварийные и особые нагрузки на каркас не учитываются.

6. Коэффициент надежности по ответственности принимается равным 1.

7. Расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям согласно действующим нормативным документам.

8. Для стальных конструкций из пластичных сталей при необходимости допускается дополнительно учитывать коэффициент условий работы, учитывающий допустимость работы стали за пределом текучести, величина этого коэффициента принимается равной 1,1 (СП 296.1325800.2017, прил. Б).

9. В связи с тем что в данном случае основными причинами разрушения конструкций цеха могут быть потеря устойчивости внецентренно сжатых элементов, воздействие повышенной температуры, осадка фундаментов, образование пластических шарниров и тому подобные процессы, связанные с постепенным выходом из строя элементов, допускается прикладывать нагрузку при разрушении элемента конструкции статически.

10. На основе анализа напряженно-деформированного состояния каркаса и технологического процесса были выявлены конструкции, начальное разрушение которых может оказаться наиболее критичным для каркаса и повлечь за собой его прогрессирующее обрушение.

С учетом работы двух самых тяжелых кранов (заливочный кран грузоподъемностью 400 т и завалочный кран грузоподъемностью 130 + 130 т) тяжелого режима работы 8К в пролете В-Г, а также с учетом расположения подкраново-подстропильных ферм пролетом 36 м вдоль оси Г в осях 12–15, 16–19 и 20–23 самыми опасными для рамы будут аварийные ситуации, связанные с разрушением наиболее нагруженных конструктивных элементов по оси Г и в пролетах, прилегающих к ней.

Таким образом, при расчете на лавинообразное (прогрессирующее) обрушение в качестве аварийных ситуаций (начальных локальных разрушений) были рассмотрены следующие варианты:

- разрушение наиболее нагруженной ветви наиболее нагруженной колонны по осям Г/16;

- разрушение опорного раскоса фермы пролета В-Г по оси 16;

- разрушение верхнего пояса фермы пролета В-Г по оси 16;

- разрушение нижнего пояса фермы пролета В-Г по оси 16;

- разрушение наиболее нагруженного элемента горизонтальных связей по нижнему поясу стропильных ферм пролета В-Г вблизи оси 16;

- разрушение ветви вертикальных связей С29 в осях 15–16 по оси Г;

- разрушение главной балки площадки на отметке +23,400 по оси 16;

- разрушение ветви крайней колонны по осям А/16, а также ветви крайней угловой колонны по осям А/26;

- разрушение сплошной колонны по осям Ж/16.

На рис. 2 для примера показана расчетная схема конвертерного цеха с учетом начального локального разрушения наиболее нагруженной ветви колонны по осям Г/16.

В результате расчета на все варианты аварийных ситуаций, включающих начальное локаль-

Рис. 2. Расчетная схема при расчете на аварийную ситуацию с учетом разрушения наиболее нагруженной ветви колонны по осям Г/16

ное разрушение конструкций цеха, установлено, что несущая способность каркаса обеспечена. Прогрессирующее (лавинообразное) обрушение не происходило ни при одной из рассмотренных аварийных ситуаций.

На рис. 3 показаны результаты расчета на прогрессирующее обрушение с учетом разрушения наиболее нагруженной ветви колонны по осям Г/16. Несущая способность всех конструкций цеха обеспечена.

Начальное локальное разрушение вызвало перераспределение усилий в элементах каркаса, а с учетом более низких значений нагрузок дополнительные усилия в элементах, задействованных в работе, не превысили нормативных характеристик материала, и их прочность и устойчивость были обеспечены.

Кроме того, при расчете учтено включение в работу ограждающих конструкций (стальных щитов кровли, прикрепленных к фермам и балкам покрытия с помощью сварных швов в углах и представляющих собой непрерывный жесткий сдвиговой диск в уровне кровли), а также работа на сдвиг стального настила перекрытий рабочих площадок.

Эти элементы повышают жесткость каркаса и обеспечивают дополнительное восприятие и перераспределение усилий, возникающих при локальном разрушении, распределяя усилия на соседние рамы, оказавшиеся рядом с локальным разрушением.

Таким образом, был установлен высокий уровень устойчивости к прогрессирующему обрушению стального каркаса конвертерного цеха № 2 НЛМК.

Основными причинами высокого уровня устойчивости к лавинообразному обрушению каркаса конвертерного цеха является сложность этого здания как с конструктивной, так и с технологической точек зрения, из-за чего каркас насыщен большим количеством рабочих площадок, перекрытия которых представляют собой жесткие диски с продольными и поперечными связями. Таким образом, различные участки цеха «страхуют» друг друга, и перераспределение усилий между конструкциями происходит максимально эффективно.

При проектировании и строительстве конвертерного цеха были заложены резервы несущей способности, обеспечившие безопасность каркаса даже при использовании современных норм при расчете на прогрессирующее разрушение.

Тем не менее, значительная часть промышленных зданий и сооружений аналогичного возраста имеет более простые конструктивные решения, поэтому устойчивость к прогрессирующему обрушению этих зданий может быть не обеспечена, так как при их проектировании расчет на прогрессирующее обрушение не выполнялся.

Выполняя реконструкцию таких сооружений, необходимо учитывать современные стро-

Рис. 3. Коэффициенты использования при расчете на аварийную ситуацию с учетом разрушения наиболее нагруженной ветви колонны по осям Г/16 (1-й вариант)

ительные нормы и обеспечивать устойчивость каркаса этих сооружений к прогрессирующему обрушению. Это может повлечь серьезные изменения конструктивных схем существующего каркаса и значительное его усиление. Усиление конструкций может оказаться чрезмерно затратным как по времени, так и в материальном смысле процессом, зачастую неоправданным. В таких случаях более целесообразным будет разработка конструктивных, организационных, технологических или иных мероприятий, предотвращающих возможность возникновения начальных локальных разрушений, являющихся критическими для каркаса и вызывающими его прогрессирующее обрушение.

В заключение следует сделать следующие выводы:

1. Для существующих промышленных зданий и сооружений при проведении технологических реконструкций в соответствии с действующими нормативными документами расчет на прогрессирующее обрушение является обязательным (СП 56.13330.2011, п. 5.1).

2. При определении возможных аварийных ситуаций (начальных локальных разрушений) необходимо учитывать вероятности их возникновения, а также историю и опыт эксплуатации таких промышленных зданий и сооружений.

3. В случае развития прогрессирующего обрушения при расчете на определенные аварийные ситуации следует анализировать и оценивать сложность выполнения конструктивных мероприятий и усиления, требующегося для предотвращения прогрессирующего обрушения. В случае повышенной сложности выполнения работ по усилению представляется целесообразной разработка мероприятий, предотвращающих или сводящих к минимуму вероятность возникновения начального локального разрушения, влекущего за собой прогрессирующее обрушение всего каркаса.

Это могут быть как конструктивные мероприятия по защите конструкций от внешних воздействий, так и изменения технологического процесса, обеспечение охраны объекта и т. д., — такие мероприятия, которые позволят повысить живучесть существующего каркаса с обеспечением минимальных затрат со стороны заказчика.

Библиографический список

1. Wang H., Zhang A., Li Y., Yan W. A Review on Progressive Collapse of Building Structures // *The Open Civil Engineering Journal*. 2014. Vol. 8. Pp. 183–192.
2. Starossek U. Typology of progressive collapse // *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29. Pp. 2302–2307.
3. 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. Vol. 30. Pp. 1308–1318.
4. Vlassis A. G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss — Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Pp. 1424–1438.
5. Adam J. M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149.
6. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness // *Structural Safety*. 2008. Vol. 30. Pp. 253–267.
7. England J., Agarwal J., Blockley D. The vulnerability of structures to unforeseen events // *Computers and Structures*. 2008. Vol. 86. Pp. 1042–1051.
8. Khandelwal K., El-tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis // *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33. Pp. 2653–2661.
9. Le J., Xue B. Probabilistic analysis of reinforced concrete frame structures against progressive collapse // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 76. Pp. 313–323.
10. Тамразян А. Г. Ресурс живучести — основной критерий проектных решений высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2010. № 1. С. 15–19.
11. Мондрус В. Л., Мкртычев О. В., Мкртычев А. Э. Исследование большепролетного сооружения на надежность при случайных сейсмических воздействиях // *Вестник МГСУ*. 2012. № 5. С. 56–61.
12. Данилов А. И. Концепция управления процессом разрушения строительного объекта // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 8. С. 74–77.
13. Кудишин Ю. И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2009. № 2 (спец.) С. 28–36.
14. Tusnín A. Dynamic factors in case of damaging continuous beam supports // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 2 (78). Pp. 47–64.
15. Berger M., Tusnín A. Experimental justification of the dynamic coefficient // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. doi:10.1088/1757-899X/365/5/052020.

16. Berger M., Tusnin A. Stress redistribution in flat damaged trusses // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704033>.
17. Song B. I., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 56. Pp. 664–672.
18. 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.
19. Еремеев П. Г. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях // *Современное промышленное и гражданское строительство*. № 4 (3). С. 129–134.
20. Ройтман В. М. Нормирование и проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: основные подходы // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2011. № 2. С. 45–51.
21. Тамразян А. Г. Оценка обобщенного риска промышленных объектов, связанного со строительством и эксплуатацией // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 10. С. 12–14.
22. Ведяков И. И., Еремеев П. Г., Соловьев Д. В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 12. С. 14–19.
7. England J., Agarwal J., Blockley D. The vulnerability of structures to unforeseen events. *Computers and Structures*, 2008, vol. 86, pp. 1042–1051.
8. Khandelwal K., El-Tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, pp. 2653–2661.
9. Le J., Xue B. Probabilistic analysis of reinforced concrete frame structures against progressive collapse. *Engineering Structures*, 2014, vol. 76, pp. 313–323.
10. Tamrazyan A. G. *Resurs zhivuchesti — osnovnoy kriteriy proektnykh resheniy vysotnykh zdaniy* [Resource of survivability as the main criterion of design decisions of high-rise buildings]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo — Housing construction*, 2010, no. 1, pp. 15–19.
11. Mondrus V. L., Mkrtichev O. V., Mkrtichev A. Eh. *Issledovanie bol'sheproletnogo sooruzheniya na nadezhnost' pri sluchaynykh seysmicheskikh vozdeystviyakh* [Investigation of long-span structures for reliability under random seismic loading]. *Vestnik MGSU — Bulletin of MGSU*, 2012, no. 5, pp. 56–61.
12. Danilov A. I. *Kontseptsiya upravleniya protsessom razrusheniya stroitel'nogo ob'ekta* [Concept of control over the construction object collapse process]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo — Industrial and civil construction*, 2014, no. 8, pp. 74–77.
13. Kudishin Yu. I. *Kontseptual'nye problemy zhivuchesti stroitel'nykh konstruksiy* [Conceptual problems of survivability of building structures]. *Vestnik MGSU — Bulletin of MGSU*, 2009, no. 2, pp. 28–36.
14. Tusnin A. Dynamic factors in case of damaging continuous beam supports. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 2 (78), pp. 47–64.
15. Berger M., Tusnin A. Experimental justification of the dynamic coefficient. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365. DOI:10.1088/1757-899X/365/5/052020.
16. Berger M., Tusnin A. Stress redistribution in flat damaged trusses. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 97. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704033>.
17. Song B. I., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of the steel frame building. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 664–672.
18. 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.
19. Еремеев П. Г. *Obespechenie bezopasnosti bol'sheproletnykh sooruzheniy ot lavinoobraznogo (progressiruyushchego) obrusheniya pri avariynnykh vozdeystviyakh* [Ensuring the safety of large-span structures from avalanche (progressive) collapse under emergency impacts] *Sovremennoe promyshlennoe i*

References

1. Wang H., Zhang A., Li Y., Yan W. A Review on Progressive Collapse of Building Structures. *Open Civil Engineering Journal*, 2014, vol. 8, pp. 183–192.
2. Starossek U. Typology of progressive collapse. *Engineering Structures*, 2007, vol. 29, pp. 2302–2307.
3. Izzuddin B. A., Vlassis A. G., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Pt I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*, 2008, vol. 30, pp. 1308–1318.
4. Vlassis A. G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss. Pt II: Application. *Engineering Structures*, 2008, vol. 30, pp. 1424–1438.
5. Adam J. M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, 2018, vol. 173, pp. 122–149.
6. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness. *Structural Safety*, 2008, vol. 30, pp. 253–267.

grazhdanskoe stroitel'stvo – Modern industrial and civil construction, no. 4 (3), pp. 129–134.

20. Roytman V. M. *Normirovanie i proektirovanie zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya: osnovnye podkhody* [Rationing and design of buildings and structures protection from progressive collapse: main approaches]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzheniy – Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2011, no. 2, pp. 45–51.

21. Tamrazyan A. G. *Otsenka obobshchennogo riska promyshlennykh ob'ektov, svyazannogo so stroitel'stvom i ehkspluatatsiey* [Assessment of generalized risk of

industrial facilities associated with construction and operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2010, no. 10, pp. 12–14.

22. Vedyakov I. I., Ereemeev P. G., Solov'ev D. V. *Nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie i normativnye trebovaniya pri realizatsii proektov zdaniy i sooruzheniy povyshennogo urovnya otvetstvennosti* [Scientific and technical support and regulatory requirements in the implementation of projects of buildings and structures of increased level of responsibility]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2018, no. 12, pp. 14–19.