

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОВРЕЖДЕННОЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОЙ ФЕРМЫ В СОСТАВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КАРКАСА

marieberger@yandex.ru

Устойчивость зданий и сооружений к прогрессирующему обрушению является одной из самых актуальных проблем современного проектирования. Этот вопрос рассмотрен в ряде научных статей, имеются рекомендации по расчёту и проектированию некоторых конструкций при их повреждении. Однако по-прежнему отсутствует единая общепринятая методика расчета. В данной статье приводится обзор существующих отечественных и зарубежных нормативных документов, посвященных вопросам расчета живучести конструкций и устойчивости к прогрессирующему обрушению. Представлены приёмы численного расчёта конструкций с повреждениями. Выполнено исследование работы стальных повреждённых ферм в составе каркаса большепролетного здания. Рассмотрены разные варианты выключения элементов фермы из работы и выполнены численные расчеты повреждённых ферм в статической и динамической постановках. По полученным результатам вычисляется коэффициент динамичности. Анализ величин коэффициентов динамичности в зависимости от времени выхода элемента из строя позволит скорректировать проводимый статический расчет и, в дальнейшем, снизить металлоемкость конструкции.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, живучесть, динамический расчет, большепролетный каркас, коэффициент динамичности.

Введение. При проектировании ответственных зданий и сооружений приходится решать задачу предотвращения прогрессирующего обрушения зданий или обеспечение живучести конструкций при повреждении. Нормативные документы многих стран содержат указания о необходимости проведения расчетов, связанных с обеспечением несущей способности конструкций при возникновении аварийной ситуации. Однако до сих пор отсутствует утвержденная и адаптированная для повсеместного использования методика расчета повреждённых конструкций. Большая часть проводимых исследований посвящена проблеме защиты высотных зданий от прогрессирующего обрушения. Несущая способность повреждённых каркасов большепролетных зданий изучена в меньшей степени, несмотря на то, что разрушение большепролетных зданий также ведёт к значительным социальным, экологическим и материальным потерям. Данная работа направлена на изучение несущей способности конструкций большепролетных зданий при возникновении аварийной ситуации.

Обзор нормативных требований. Расчет на прогрессирующее обрушение и рекомендации по его выполнению рассматриваются и в российских, и в некоторых зарубежных нормах.

В российских нормативных документах этот вопрос оговаривается в [1, 2]. Данными документами регламентируется необходимость проведения расчета с учетом возникновения аварийной ситуации с целью недопущения прогрессирующего

обрушения. На территории РФ также действуют рекомендации МНИИТЭП и ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко по расчету различных типов (каркасных, монолитных, панельных и др.) жилых зданий от прогрессирующего обрушения [3–7]. В них приводится подробная методика расчета с разбором примера расчета конкретного здания. По расчету большепролетных зданий выпущены временные рекомендации [8]. В них изложены требования и конструктивные мероприятия по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от прогрессирующего обрушения.

В украинских нормах [9] упоминается обеспечение живучести объекта за счет проведения мероприятий по повышению безопасности, увеличению материалоемкости, включения в работу пространственной системы ненесущих конструкций, создания неразрезности конструкций и др. При расчете поврежденных конструкций допускается учитывать динамические эффекты «путем соответствующего увеличения нагрузки или умножением результатов статического расчета на коэффициент динамичности».

В Белоруссии и странах Евросоюза действует Еврокод 1, часть 1–7 [10]. В нем приводится классификация воздействий и расписаны варианты расчетных ситуаций при особых воздействиях. Описаны различные виды ударных и взрывных воздействий в зависимости от назначения здания. Справочные приложения посвящены проектированию с учетом последствий локаль-

ного разрушения конструкций в зданиях в результате неустановленной причины (приложение А), оценке рисков (приложение В), динамическому расчету удара (приложение С), взрывам внутри помещений (приложение D).

В нормативных документах США, Японии, Австралии и Новой Зеландии [11–15] применяются два основных подхода для уменьшения риска возникновения прогрессирующего обрушения:

1. прямой метод (Direct Design);

Он включает в себя:

– способ перераспределения нагрузки (the Alternate Path method), который требует наличия конструктивных элементов, позволяющих включить в работу неповрежденные элементы взамен разрушенных и таким образом ограничить распространение разрушения;

– метод локальной прочности (the Specific Local Resistance method) требует, чтобы здание целиком или отдельные его фрагменты сохраняли необходимую прочность при возникновении аварийной ситуации.

2. косвенный метод (Indirect Design).

При косвенном методе устойчивость к прогрессирующему обрушению обеспечивается выполнением требований минимизации видов НДС (минимальной связности/прочности), неразрезности конструктивной схемы и учетом пластических свойств материалов.

В нормативном документе США [11] основное внимание уделяется способу установки связей для повышения неразрезности, пластичности и конструктивной избыточности при определении минимальных растягивающих усилий, необходимых для объединения фрагментов конструкции в единое целое [16].

В нормах Японии [13] в качестве одной из целей проектирования указано обеспечение целостности, пластичности и живучести конструкции при особых воздействиях без наступления прогрессирующего обрушения, где допускается использование метода перераспределения нагрузки. Конструктивная целостность должна быть обеспечена связыванием всех элементов вертикальными и горизонтальными связями. Должны быть определены «ключевые элементы» – элементы, устойчивость которых влияет на устойчивость конструкции в целом. Данные элементы должны проектироваться с учетом воздействия аварийных нагрузок при возникновении чрезвычайной ситуации. Остальные элементы конструкции должны сохранять устойчивость при удалении любого не-ключевого элемента каркаса с помощью перераспределения нагрузки.

Исследование работы фрагмента каркаса большепролетного здания. С учётом проведённого обзора можно сделать вывод об актуальности изучения живучести покрытий с использованием большепролётных ферм, входящих в составе каркаса большепролетного здания. Предполагается выявить закономерности распределения усилий в ферме при выходе из строя отдельных ее элементов с учётом времени развития повреждений. На основе выявленных особенностей работы поврежденных ферм установить величину коэффициента динамичности для нагрузки, действующей на ферму. Использование коэффициента динамичности позволит (не в ущерб точности) упростить проектирование конструкций за счёт применения квазистатического расчета. На основании проведённых исследований предполагается разработка рекомендаций и методики расчёта повреждённых большепролётных ферм.

Для достижения указанной цели следует выполнить теоретические и экспериментальные исследования повреждённых большепролётных ферм, провести расчёты с применением апробированных вычислительных комплексов, сопоставить экспериментальные и расчётные данные. Численные исследования следует выполнять в динамической постановке с учётом времени повреждения элементов фермы [17–18].

Рассмотрим применение вычислительного комплекса Femap with NX Nastran [19–20] для расчёта большепролётных повреждённых ферм в составе каркаса в динамической постановке. Для исследования выбран фрагмент пространственного большепролетного здания, состоящий из пяти плоских рам, объединённых системой связей по верхним и нижним поясам ферм. Принятые габариты здания составляют: пролет – 80 м, высота – 25 м, высота фермы на опорах – 5.4 м, в коньке – 7.4 м, шаг ферм – 6 м. Выбор фрагмента из 5 рам обусловлен рекомендациями по расчету с учетом пространственной работы конструкций [21].

Существуют различные конструктивные мероприятия по повышению живучести конструкции, например, установка дополнительных вертикальных и горизонтальных связей, включение в работу каркаса прогонов и др. Некоторые из перечисленных вариантов показаны на рисунке 1.

На начальном этапе рассматривается работа одной фермы, с целью определения коэффициентов динамичности. Далее с учётом выявленных особенностей поведения повреждённой фермы предполагается исследовать работу поврежденных большепролетных ферм в составе каркаса здания.

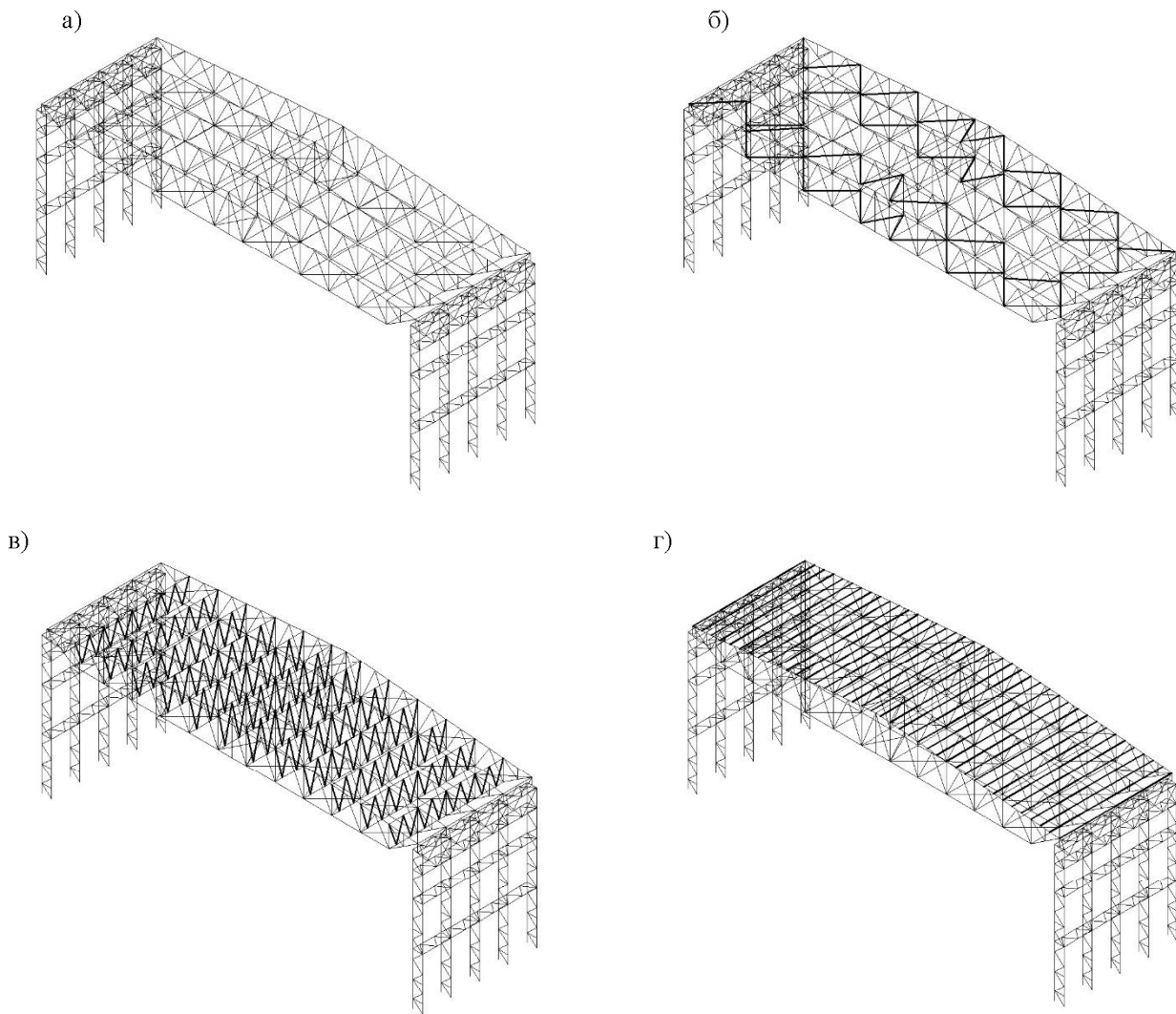


Рис. 1. Фрагмент каркаса большепролётного здания. а) исходный; б) с дополнительными горизонтальными связями; в) с дополнительными вертикальными связями; г) с прогонами, введенными в расчетную схему

В примере расчёта на ферму совместно действуют постоянная и снеговая нагрузка. В соответствии с принятой в действующих нормах методикой расчёт выполняется на действие нормативной длительной нагрузки. Постоянная нормативная нагрузка составляет 10 кН на узел фермы,

нормативная длительная снеговая нагрузка (III район согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия») 18 кН [22]. Ферма загружена узловой вертикальной нагрузкой (рис.2. Геометрическая схема фермы с приложенной узловой нагрузкой).

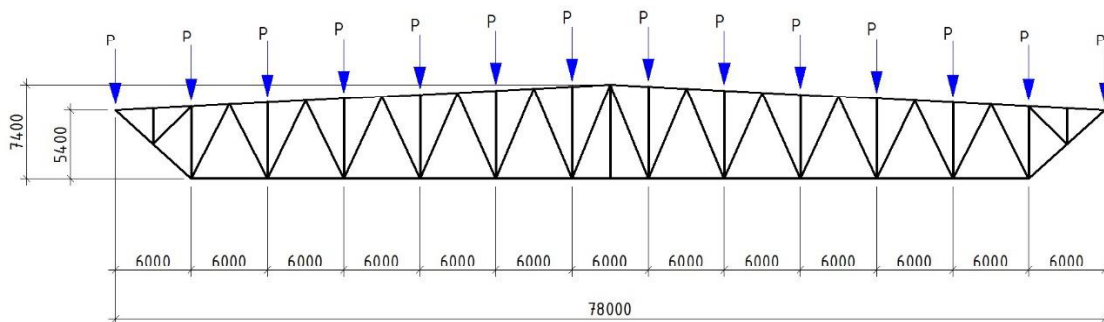


Рис. 2. Геометрическая схема фермы с приложенной узловой нагрузкой

Принятые сечения элементов фермы: верхний и нижний пояса из горячекатаных колонных двутавров I40K2, решетка коробчатого типа из сдвоенных швеллеров №30 и №24.

Рассмотрены следующие варианты повреждения каркаса (выбраны наиболее нагруженные элементы фермы):

- 1. поврежден элемент верхнего пояса фермы;
- 2. поврежден элемент нижнего пояса фермы;

- 3. поврежден раскос фермы.
- Варианты повреждения фермы показаны на рис. 3.

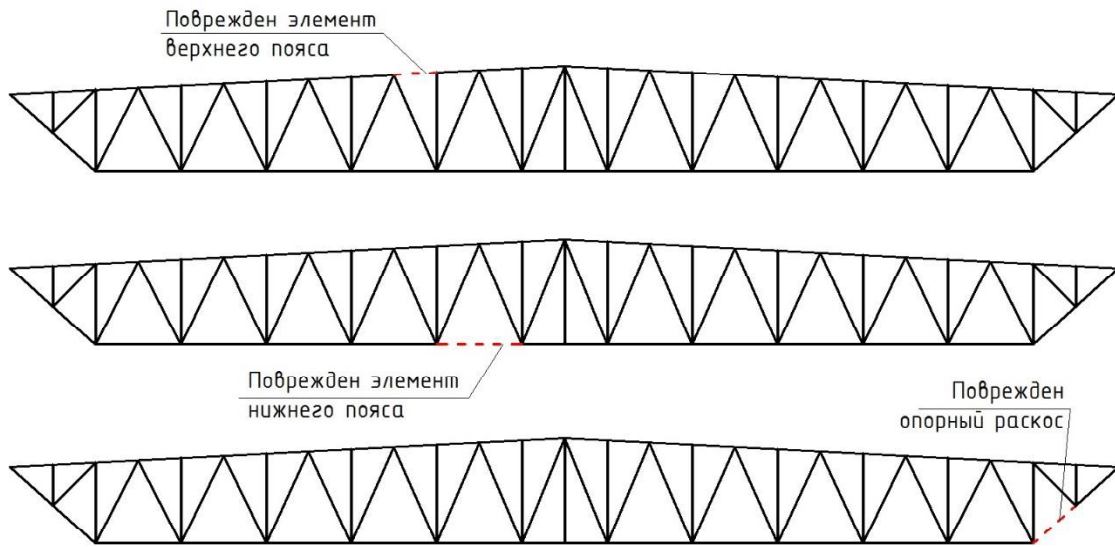


Рис. 3. Варианты повреждения фермы

На первом этапе исследования производился статический расчет неповрежденной конструкции на действие нормативной длительной нагрузки. Затем из расчетной схемы удалялся элемент, соответствующий рассматриваемому варианту повреждения каркаса, выполнялся статический расчет поврежденной конструкции и определялись частоты собственных колебаний поврежденной фермы. Первая частота колебаний использовалась для назначения параметров динамического расчёта при повреждении. После определения частот выполнялись динамические расчёты поврежденной конструкции.

При проведении динамического расчёта вместо исключаемого стержня к узлам прикладывались силы эквивалентные действующим усилиям в стержне неповрежденной конструкции. Величины сил, моделирующих исключаемые стержни, увеличивались от 0 до полного значения за 20 сек, а затем уменьшались до нуля за определенный промежуток времени. Рассматривались временные промежутки 0.01 с, 0.1 с и 1 с. Узловая нагрузка на ферму увеличивалась от 0 до полного значения за 20 сек и в дальнейшем оставалась постоянной. Графики приложения узловой нагрузки на ферму и изменения усилий поврежденного стержня со временем показаны на рис. 4а и 4б.

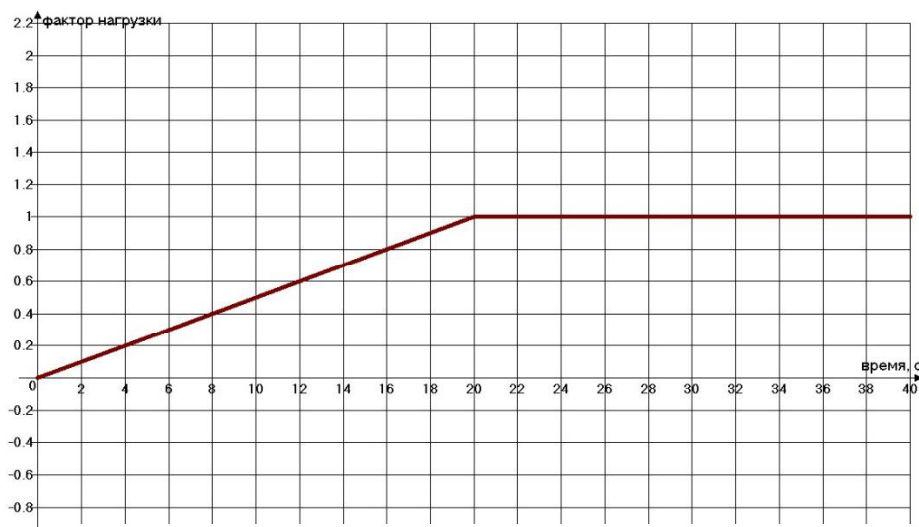


Рис.4а. График приложения узловой нагрузки.

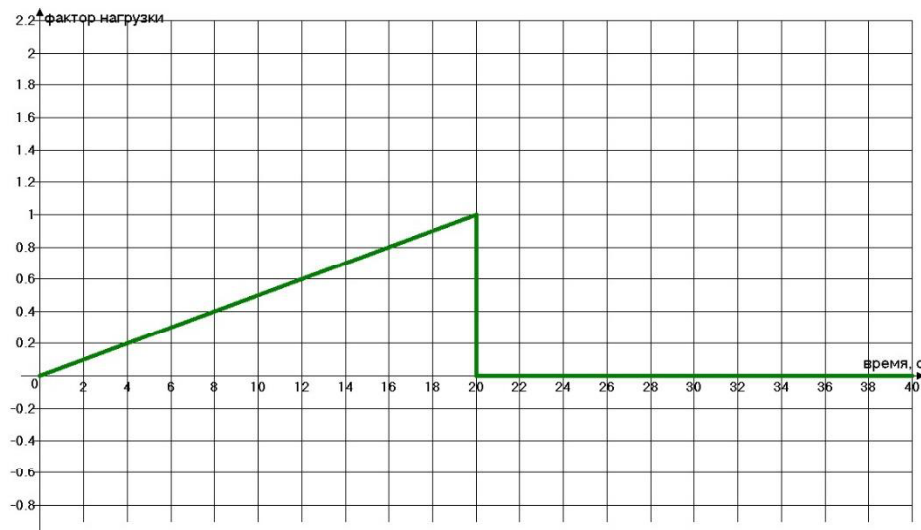


Рис. 46. График изменения усилий поврежденного стержня со временем

Коэффициенты динамичности рассчитывались как отношение максимальных усилий, полученных при динамическом расчете, к максимальным усилиям, возникающим при статическом расчете.

Расчёты выполнялись вычислительным комплексом Femap with NX Nastran, ver. 11.1.0, кон-

струкция моделировалась стержневыми элементами типа Beam, используемый модуль динамического расчета – 3. Direct Transient.

В табл. 1 приведены максимальные значения полученных коэффициентов динамичности для различных вариантов повреждения конструкции плоской большепролетной фермы и времени выхода выбранных элементов из строя.

Таблица 1

Коэффициенты динамичности поврежденной фермы

Поврежденный элемент конструкции	Параметр	Статическое усилие	Динамическое усилие		
			t=0.01 с	t=0.1 с	t=1 с
Нижний пояс	N, кН	-475.7	-827.8	-825.9	-669.4
	$k_{дин}$	-	1.740	1.736	1.407
	M, кНм	3104.5	5680.6	5671.2	4524.2
	$k_{дин}$	-	1.830	1.827	1.457
Верхний пояс	N, кН	390.3	664.5	663.6	579.6
	$k_{дин}$	-	1.703	1.700	1.485
	M, кНм	2582.5	4743.4	4735.8	4074.0
	$k_{дин}$	-	1.837	1.834	1.578
Опорный раскос	N, кН	336.7	558.8	547.8	370.1
	$k_{дин}$	-	1.660	1.627	1.099
	M, кНм	52.4	86.9	85.2	57.6
	$k_{дин}$	-	1.658	1.626	1.099

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее неблагоприятным вариантом повреждения для плоской фермы является повреждение элемента одного из поясов. В момент выхода элемента из строя в конструкции возникают затухающие колебания. Время затухания колебаний зависит от варианта повреждения фермы: при повреждении поясов оно составляет 50–60 с, при отказе элемента опорного раскоса – 30 с.

Максимальные усилия возникают в элементах в среднем через 1 с после начала колебаний. В соседних с местом повреждения стойках и раскосах образуется максимальная продольная сила,

в элементах пояса напротив места повреждения образуются максимальные моменты.

Полученные усилия не превышают предела прочности принятых сечений фермы, и, таким образом, удовлетворяют требованиям первой группы предельных состояний.

Выводы. Анализ приведенных нормативных документов и результатов расчета фермы с повреждениями показали, что:

1. представленные в нормах некоторых стран рекомендации по расчёту повреждённых конструкций включают общие требования, однако в них отсутствуют методики, которые позволяют рассчитать фермы с повреждениями;

2. при динамическом расчете рассмотренной большепролетной фермы наиболее неблагоприятные усилия и деформации получены для временного промежутка 0.01 с. Установлено значительное уменьшение коэффициента динамичности при увеличении времени повреждения от 0.1 до 1 сек;

3. статический и динамический расчеты поврежденного каркаса выявили разницу усилий в 1.12 раза (усилия динамического расчёта меньше усилий статического расчёта), что позволяет снизить величину коэффициента динамичности с 2 до 1.8;

4. для подтверждения результатов численных расчётов необходимо проведение экспериментальных исследований.

Целью проводимой работы является экспериментально-теоретическое обоснование основных принципов расчета несущей способности плоских большепролетных ферм в составе металлического каркаса при различных вариантах повреждений элементов фермы и последующая адаптация полученной расчетной методики для использования ее на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М.: Изд. Стандартинформ, 2015. 16 с.
2. Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ (ред. от 02.07.2013). Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.
3. Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А., Травуш В.И. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения М.: Изд. Москомархитектура, 2006. 74 с.
4. Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А., Залесов А.С. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. М.: Изд-во Москомархитектура, 2005. 59 с.
5. Шапиро Г.И., Коровкин В.С., Эйсман Ю.А., Стругацкий Ю.М. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: Изд-во Москомархитектура, 2002. 20 с.
6. Шапиро Г.И., Коровкин В.С., Эйсман Ю.А., Стругацкий Ю.М. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. М.: Изд-во Москомархитектура, 2002. 24 с.
7. Стругацкий Ю.М., Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. М.: Изд-во Москомархитектура, 1999. 55 с.
8. МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. М.: Изд-во НИЦ «Строительство», 2008. 17 с.
9. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. Киев: Изд-во Минрегионстрой Украины, 2009. 45 с.
10. ТКП EN 1991-1-7-2009 (02250). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия. Минск: Изд-во Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. 67 с.
11. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. Department of Defense USA, 2013. 245 с.
12. ASCE/SEI 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2010. 658 с.
13. Code of practice for the structural use of steel. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2011. 388 с.
14. NISTIR 7386. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. U.S. Department of Commerce / Technology Administration / National Institute of Standards and Technology, 2007. 216 с.
15. AS/NZS 1170.0:2002. Australian/New Zealand Standard. Structural design actions. Part 0: General principles. SAI Global Limited, 2002. 42 с.
16. Грачев В.Ю., Вершинина Т.А., Пузаткин А.А. Непропорциональное разрушение. Сравнение методов расчета. Екатеринбург.: Изд-во Ажур, 2010. 81 с.
17. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // Металлические здания. 2008. №4(8). С. 20–22.
18. Кудишин Ю.И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2009. № 2 (спец.). С. 28–36.
19. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2003. 448 с.
20. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2013. 784 с.
21. Белея Е.И., Балдин В.А., Ведеников Г.С. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для ВУЗов. М.: Изд-во Стройиздат, 1986. 560 с.
22. СП 20.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. М.: Изд. ГУП ЦПП, 2011. 36 с.

Информация об авторах

Бергер Мария Петровна, аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций.

E-mail: marieberger@yandex.ru.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила в декабре 2017 г.

© Бергер М.П., 2018

M.P. Berger

STABILITY OF A DAMAGED LARGE-SPAN TRUSS IN THE SPATIAL STRUCTURE

The prevention of the progressive collapse is one of the most relevant problems of modern structural engineering. There are a lot of scientific articles and codes of practice for calculation and design of certain structures in the event of their damage. However, there is a lack of common method of calculation. This article provides an overview of existing Russian and foreign regulatory documents on the calculation of structure robustness and resistance to progressive collapse. The methods of numerical calculation of damaged structures are presented. A study of the deflected mode of damaged steel trusses in the framework of a large-span building was performed. Different variants of damaged elements of the truss are considered and static and dynamic analysis of the damaged steel trusses are performed. The obtained results make it possible to calculate the dynamic coefficient. Analysis of the values of the dynamic coefficients depending on the time of failure of the element will allow to correct the static analysis and, in the future, to reduce the metal capacity of the structure.

Keywords: *progressive collapse, robustness, dynamic calculation dynamic input, large-span frame, dynamic factor.*

Information about the authors

Maria P. Berger, Research assistant.

E-mail: marieberger@yandex.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl'skoe Shosse, 26.

Received in December 2017