

## СПОСОБЫ УСИЛЕНИЯ ОДНОЭТАЖНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ, ОБОРУДОВАННОГО МОСТОВЫМ КРАНОМ, ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

*О. Б. Завьялова, Р. А. Завьялов*

**Завьялова Ольга Борисовна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru;

**Завьялов Роман Александрович**, магистрант, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: 39bazaz@gmail.com

В статье рассмотрена методика расчета одноэтажного большепролетного промышленного здания со стальным каркасом на прогрессирующее обрушение по нескольким вариантам развития сценариев. В качестве вариантов отказов проанализированы обрушения рядовой колонны крайнего и среднего ряда, а также отказ опорного раскоса стальной стропильной фермы. Задача решена в линейной постановке, возможный поддерживающий эффект со стороны ограждающих конструкций на этой стадии исследования не учитывался. По результатам расчетного анализа предложены способы усиления основных несущих конструкций, препятствующие обрушению несущих и ограждающих элементов покрытия. Предлагаемые способы не затрудняют работу кранового оборудования, а наоборот они эффективны и экономичны.

**Ключевые слова:** прогрессирующее обрушение, одноэтажное промышленное здание, стальной каркас.

## METHODS OF STRENGTHENING A SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDING EQUIPPED WITH A BRIDGE CRANE, WHILE PROTECTING AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE

*O. B. Zavyalova, R. A. Zavyalov*

**Zavyalova Olga Borisovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru;

**Zavyalov Roman Aleksandrovich**, undergraduate student, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: 39bazaz@gmail.com

The article considers the method of calculating a single-storey large-span industrial building with a steel frame for progressive collapse according to several scenarios. The collapse of an ordinary column of the extreme and middle row, as well as the failure of the support strut of a steel truss, were analyzed as failure options. The problem was solved in a linear formulation, the possible supporting effect from the enclosing structures was not taken into account at this stage of the study. According to the results of the computational analysis, methods of strengthening the main load-bearing structures that prevent the collapse of the load-bearing and enclosing elements of the coating are proposed. The proposed methods do not interfere with the operation of crane equipment, while they are quite efficient and economical.

**Keywords:** progressive collapse, one-story industrial building, steel frame.

### Введение

Технический регламент о безопасности зданий и сооружений [1] в п. 6 ст. 16 отмечает, что «при проектировании здания или сооружения повышенного уровня ответственности должна быть учтена также аварийная расчетная ситуация, ... возникающая после отказа одной из несущих строительных конструкций». В современной научной литературе [4–12] подробно рассмотрены способы усиления монолитных железобетонных многоэтажных зданий (в основном за счет резервирования прочности окружающих конструкций), а вот рекомендации по усилению промышленных одноэтажных зданий практически отсутствуют. Рассмотренное нами одноэтажное промышленное здание судостроительного завода в г. Астрахани, хотя и не относится к сооружениям высокого уровня ответственности, имеет повышенную высоту и оснащено шестью мостовыми кранами тяжелого режима работы грузоподъемностью 100 и 50 т. В цехе трудится большое количество рабочих, поэтому нами были предусмотрены мероприятия по недопущению обрушения конструкции покрытия по трем вариантам развития аварийной ситуации. Характеристики здания: одноэтажное двухпролетное промышленное

со стальным каркасом, шаг колонн – 12 м, пролеты – по 30 м. Опирающие ригели на колонны принято шарнирными. Поперечный разрез здания с размерами представлен на рисунке 1. Схема рамы с нагрузками для статического расчета показана на рисунке 2.

### Методы исследования

Для расчета на прогрессирующее обрушение по результатам статического расчета поперечной рамы была запроектирована и собрана пространственная модель исследуемого здания (рис. 3). Вертикальные связи по рядам колонн не показаны, так как при обрушении рядовой колонны, не принадлежащей к связевому блоку, их влияние на несущую способность отсутствует. Согласно СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» [2], «расчет защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения следует выполнять на особое сочетание нагрузок», включающее «постоянные и длительные временные нагрузки, в том числе пониженные значения кратковременных нагрузок», принимаемые в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [3].

В качестве нагрузок приняты постоянная и временная длительно действующие снеговые на покрытие с коэффициентами надежности, равными единице. Относящиеся к кратковременным крановые вертикальные и горизонтальные нагрузки в этом расчете не учитывались, так как при обрушении колонны кран неминуемо тоже упадет. Даже если предположить, что подкрановые балки (в случае их неразрезной схемы) смогут «подвиснуть» без опирания на упавшую колонну, мостовой кран в любом случае сойдет с рельсов, и подобная попытка удержания подкрановых балок навесу лишена

целесообразности. Согласно п. 9.4.1 [1], «для повышения устойчивости к прогрессирующему обрушению одноэтажных каркасных зданий при соответствующем обосновании следует устанавливать конструкции, обеспечивающие перераспределение усилий после локального разрушения одного из несущих элементов каркаса». Таким образом, нами была поставлена задача недопустимости падения конструкций покрытия при обрушении колонны крайнего и среднего ряда, а также при отказе опорного раскоса рядовой фермы.

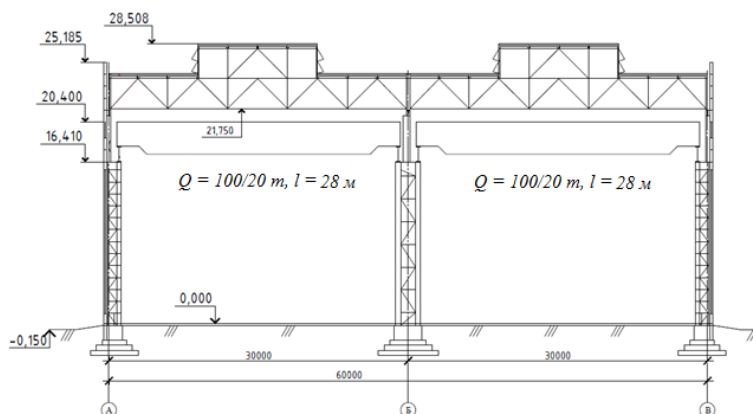


Рис. 1. Поперечный разрез одноэтажного промышленного здания

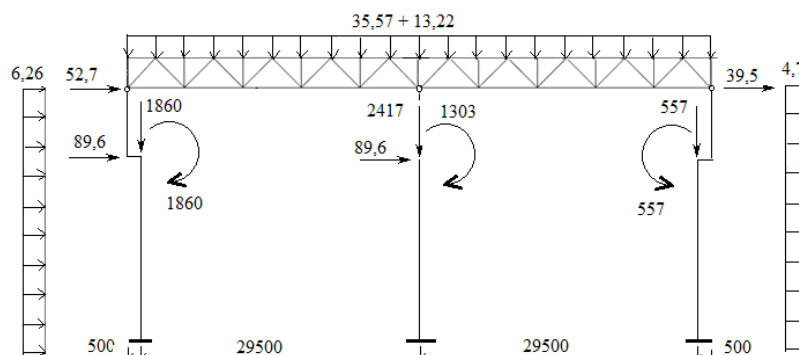


Рис. 2. Поперечная рама с примененными постоянными снеговыми, ветровыми, крановыми вертикальными и тормозными нагрузками (нагрузки от стен и остекления условно не показаны)

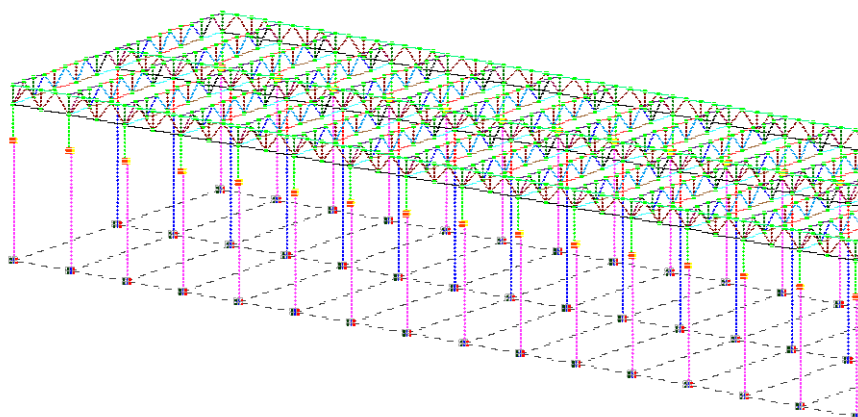


Рис. 3. Фрагмент расчетной модели здания в программе Лира-САПР (подкрановые балки и вертикальные связи по колоннам условно не показаны)

В соответствии с [1], расчет и последующий анализ состояния конструктивной схемы надземных конструкций здания или сооружения на защиту

от прогрессирующего разрушения допускается проводить по пространственной расчетной схеме без учета взаимодействия с грунтовым основанием,

поэтому грунт в данном расчете не задавался, опирание колонн было принято абсолютно жестким.

**Первый вариант – обрушение рядовой колонны крайнего ряда**

В рассматриваемом здании для предотвращения прогрессирующего обрушения при удалении колонны по каждому ряду колонн были введены подстропильные фермы, работающие по схеме неразрезной балки. Они воспринимают опорную реакцию фермы и перераспределяют ее на

остальные колонны. Высота подстропильной фермы равна высоте стропильной на опоре, то есть 3,15 м.

Элементы этой фермы изначально заданы по примерным усилиям прикидочного расчета, материал – прокатная сталь марки ВСтЗпсб.

По результатам расчета показана схема перемещений несущих конструкций покрытия при удалении рядовой колонны крайнего ряда (рис. 4) и мозаика нормальных усилий в элементах каркаса (рис. 5).

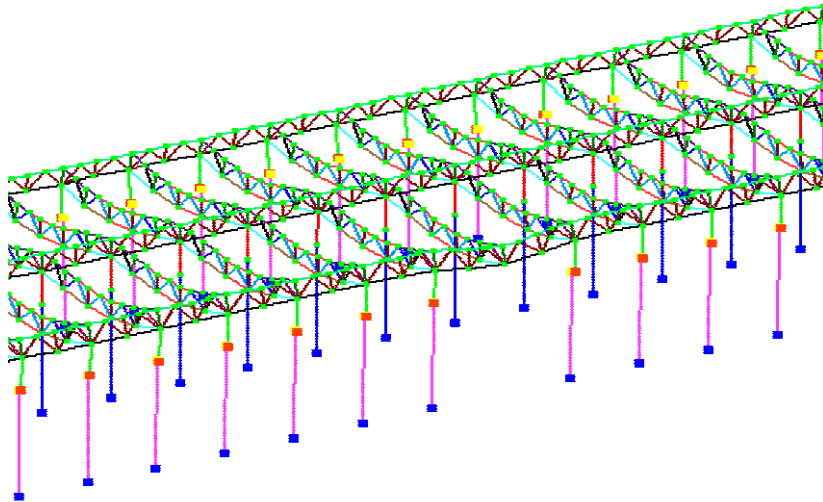


Рис. 4. Эпюра перемещений при удалении колонны крайнего ряда

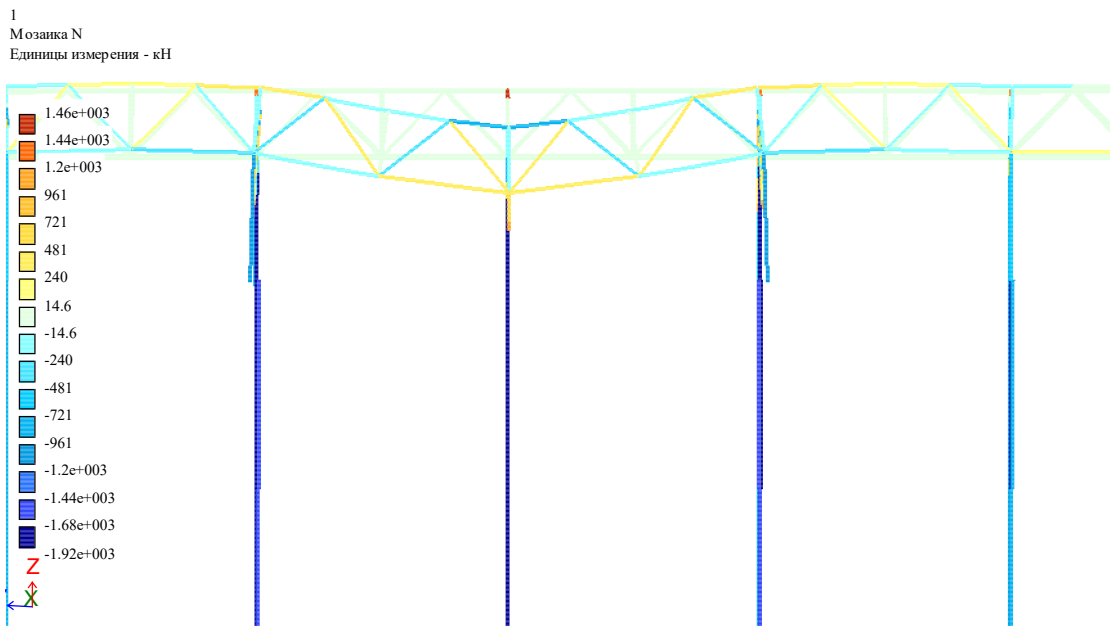


Рис. 5. Мозаика нормальных сил, прогиб подстропильной фермы

**Анализ результатов**

Перемещение подстропильной фермы в месте удаленной колонны составило 47 мм, что не превышает максимально допустимого по [1] при условии сохранения несущей способности. Проверка несущей способности элементов показала, что необходимо увеличение сечений верхнего пояса (рис. 5). Проектный расчет элементов для полученных усилий произведен в подпрограмме СТК-САПР ПК «Лира-САПР». В результате подобраны: для верхнего пояса – два уголка 90 × 90 × 10, стыковка – 1 см,

для нижнего пояса – два уголка 75 × 75 × 10, для раскосов – два уголка 60 × 60 × 10. Следует отметить, что при перемещении аварийной ситуации на соседнюю колонну происходит чередование усилий в растянутых и сжатых раскосах. Те, что были сжаты, становятся растянутыми, и наоборот. Перерасчет здания с учетом новых сечений подстропильных ферм показал максимальное перемещение – 33 мм.

Анализ внутренних усилий в колоннах, ближайших к удаленной крайней колонне, приведен в таблице 1.

**Распределение усилий в колоннах, близких к удаляемой, при обрушении колонны крайнего ряда**

Колонна крайнего ряда, сечение у заделки				
Статический расчет (все нагрузки)		Расчет при обрушении (нагрузки от покрытия)		
N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	M <sub>z</sub> , кН*м
-1986,24	1570,79	-1414,0	239,0	8,0
Колонна среднего ряда, сечение у заделки				
N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	M <sub>z</sub> , кН*м
-7066,25	1950,30	1922,0	102,0	-

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что несущая способность колонн, ближайших к упавшей колонне, не нарушилась.

**Второй вариант - обрушение рядовой колонны крайнего ряда**

На рисунке 6 показана схема перемещений при удалении колонны среднего ряда, на рисунке 7 – мозаика внутренних усилий в ближайших элементах.

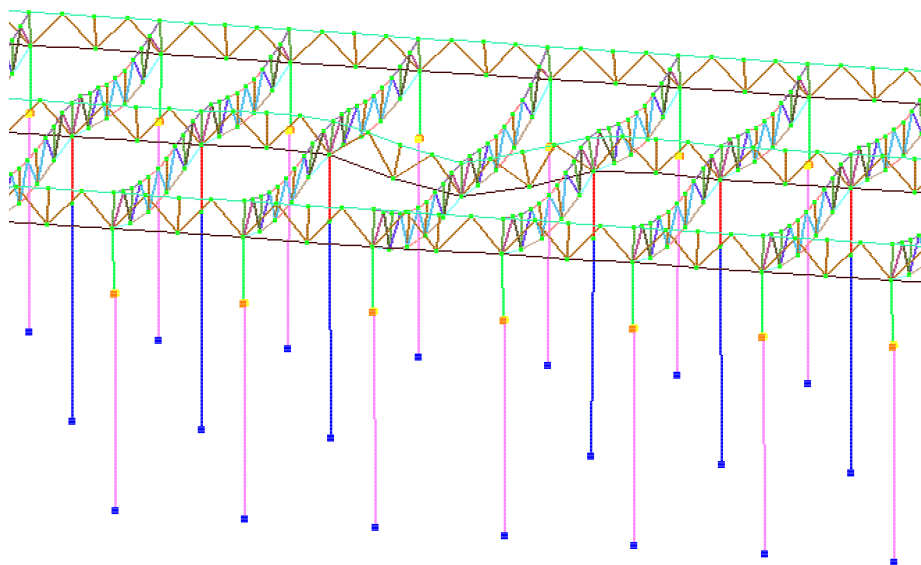


Рис. 6. Эпюра перемещений при удалении колонны крайнего ряда

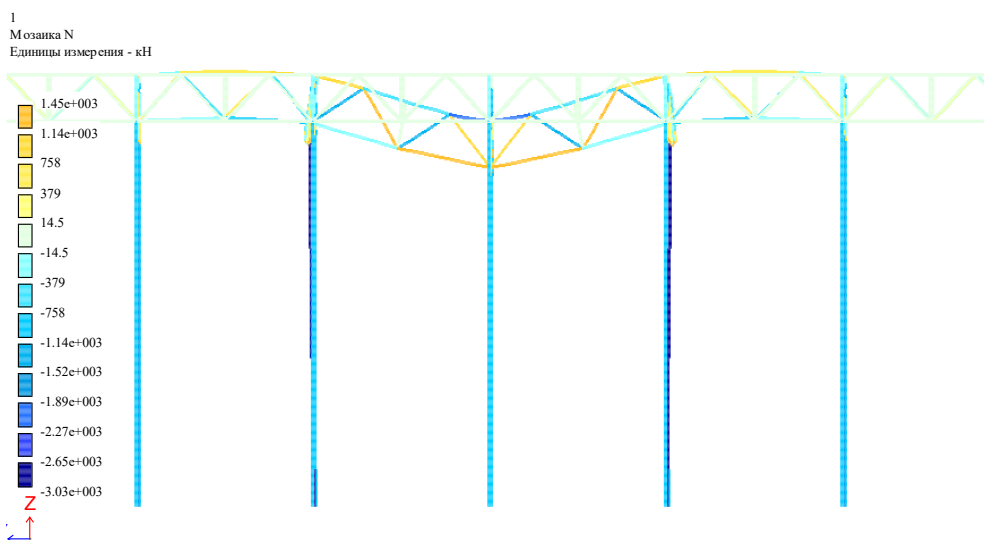


Рис. 7. Мозаика нормальных сил, прогиб подстропильной фермы при обрушении колонны среднего ряда

**Анализ результатов**

Величина перемещения в месте удаленной колонны составила 123 мм, что не превышает максимально допустимой по [1] при условии сохранения несущей способности:

$$f_l \leq [f_l] = l / 50,$$

где  $l$  – максимальный пролет между опорами, мм.  
 $f_l = 123 \text{ мм} < [f_l] = l / 50 = 12000 / 50 = 240 \text{ мм}$ ,  
 условие жесткости выполняется.

Проверка несущей способности элементов подстропильной фермы показала, что она нуждается в увеличении сечений. Сечения, подобранные программой «Лира»: верхний пояс – два уголка  $160 \times 160 \times 16$ ,

нижний пояс –  $140 \times 140 \times 10$ , раскосы – два уголка  $125 \times 125 \times 10$ , стыковка во всех сечениях 1 см.

Анализ внутренних усилий в колоннах, ближайших к удаленной средней колонне, приведен в таблице 2.

Таблица 2

**Распределение усилий в колоннах, близких к удаляемой, при обрушении колонны среднего ряда**

Колонна крайнего ряда, сечение у заделки		Колонна среднего ряда, сечение у заделки		
Статический расчет (все нагрузки)		Расчет при обрушении (нагрузки от покрытия)		
N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	M <sub>z</sub> , кН*м
-1986,24	1570,79	-1114,0	527,0	-
Колонна крайнего ряда, сечение у заделки		Колонна среднего ряда, сечение у заделки		
N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	N, кН	M <sub>y</sub> , кН*м	M <sub>z</sub> , кН*м
-7066,25	1950,30	-3030,0	-	180,0

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что несущая способность колонн крайнего ряда, ближайших к упавшей средней колонне, не нарушилась. В колоннах среднего ряда появился момент из плоскости поперечной рамы, что можно объяснить особенностью задания расчетной схемы, то есть наличием жестких узлов стыка подстропильной фермы с колонной. На полученный момент должна быть проверена устойчивость средней колонны из плоскости рамы.

**Выводы по вариантам 1 и 2**

По результатам расчета по первой и второй аварийным ситуациям подобраны сечения дополнительных элементов каркаса – подстропильных ферм, воспринимающих нагрузку от ферм покрытия и передающих ее на соседние колонны. Подстропильные фермы работают по схеме многопролетной балки. Внутренние усилия в верхнем и нижнем поясах могут чередоваться по знаку в зависимости от местоположения упавшей колонны.

Предложенный способ усиления каркаса достаточен при удалении рядовой колонны крайнего ряда. В случае удаления средней колонны должны быть также проверены смежные с ней колонны, поскольку в них возникает изгибающий момент из плоскости колонны, не учитываемый в обычном статическом расчете. В рассмотренном здании несущая способность колонн при работе из плоскости оказалась достаточной.

**Третий вариант – удаление опорного раскоса рядовой фермы**

Опорный раскос является наиболее важным элементом стропильной фермы. Он передает опорную реакцию на колонну. Удаление опорного раскоса, даже при наличии связей, устраиваемых по всему периметру унифицированного типового пролета по нижнему поясу ферм, приводит к геометрической изменчивости фермы и недопустимым перемещениям покрытия (рис. 8). Вертикальные перемещения составили 448 мм.

Загружение 1

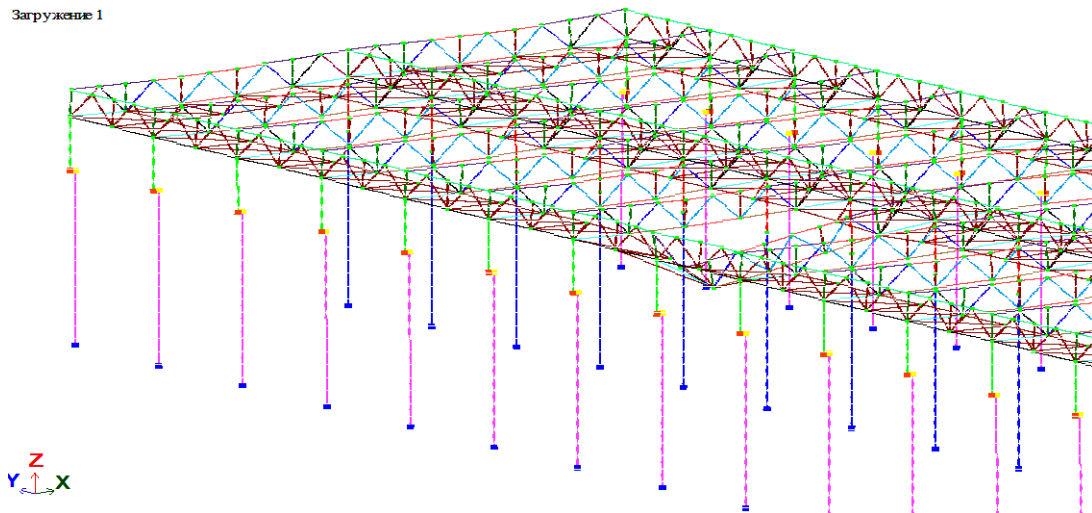


Рис. 8. Перемещение покрытия при удалении опорного раскоса (связи между колоннами и подкрановые балки условно не показаны)

Для решения проблемы был применен метод включающих связей. Для этого в систему введен дополнительный элемент, работающий на растяжение, соединяющий верх надколонника с первым нижним узлом фермы (рис. 9).

Проектный расчет связи-растяжки в программе СТК-САПР дал сечение из двух уголков  $80 \times 80 \times 12$  мм.

Повторный расчет каркаса при наличии связи-растяжки показал, что максимальные перемещения составили 41 мм, что меньше допустимых по СП 385.1325800.2018 [1].

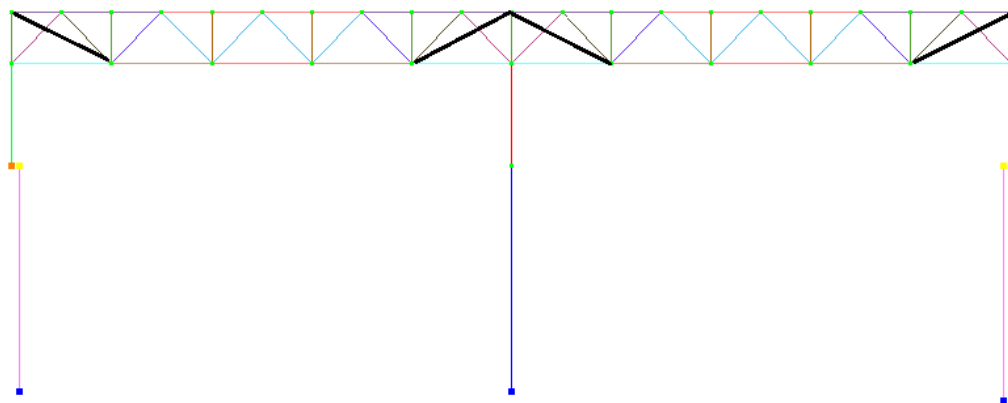


Рис. 9. Дополнительные элементы – рястяжки, включающиеся в работу при удалении опорного раскоса (показаны черным)

### Заключение

В результате рассмотрения трех возможных вариантов аварийной ситуации были применены метод альтернативной передачи усилий (при возможном обрушении колонны крайнего и среднего ряда) и метод связей (при отказе опорного раскоса стропильной фермы). Запланированные конструктивные мероприятия достаточно эффективны при возникновении аварийной ситуации,

незначительно увеличивают расход стали на здание, не требуют дополнительного пространства, не мешают производственному процессу. В обычное время они увеличивают пространственную жесткость здания при работе на горизонтальные нагрузки. В дальнейших исследованиях авторы планируют учесть нелинейную работу и поддерживающее действие ограждающих конструкций.

### Список литературы

1. Российская Федерация. Закон. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 : [принят Государственной Думой 23 декабря 2009 г. ; одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – Дата введения 2019–01–06. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 24 с.
3. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Дата введения 2017–06–04. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 95 с.
4. Завьялова О. Б. Методика расчета на прогрессирующее обрушение монолитного высотного здания гостиницы в ПК SCAD / О. Б. Завьялова, Д. Д. Виноградов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 72–78.
5. Омармагомедов И. М. Резервирование прочности несущих конструкций высотного здания для предотвращения возможного прогрессирующего обрушения / И. М. Омармагомедов, О. Б. Завьялова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 6–1 (37). – С. 53–58. – EDN UAVMBF.
6. Завьялова О. Б. Методы увеличения живучести уникальных зданий / О. Б. Завьялова, И. М. Омармагомедов // Перспективы развития строительного комплекса. – 2016. – № 1. – С. 240–249. – EDN WXPJD.
7. Рекунов С. С. Расчет многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии / С. С. Рекунов, А. Ю. Косова, С. Ю. Иванов, И. С. Завьялов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 3 (36). – С. 15–20.
8. Проектирование строительных конструкций и оснований с учетом надежности и режимных воздействий / В. С. Федоров, Т. В. Золина, Н. В. Купчикова и др. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – 209 с. – ISBN 978-5-93026-143-1. – EDN PWZTHR.
9. Zavyalova O. B. Calculation of internal efforts in combined multystoried frames taking into account changing settlement scheme / O. B. Zavyalova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chelyabinsk, 26–28 сентября 2018 года. – Chelyabinsk : Institute of Physics Publishing, 2018. – С. 012057. – DOI 10.1088/1757-899X/451/1/012057. – EDN UXZOHV.
10. Кабанцев О. В. Учет различных режимов работы конструкций при расчете несущих систем зданий / О. В. Кабанцев // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия, Москва, 19–20 апреля 2016 года / под ред. А. Г. Тамразяна, Д. Г. Копаницы. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2016. – С. 146–154. – EDN VXXJZX.
11. Завьялова О. Б. Учет истории возведения и нагружения сборных рамных каркасов / О. Б. Завьялова // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 4. – С. 34–39. – EDN SAZOJX.
12. Завьялова О. Б. Особенности создания расчетных схем, расчета и конструирования многоэтажного каркасного здания с соблюдением мер защиты от прогрессирующего обрушения / О. Б. Завьялова, В. В. Куликов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1 (39). – С. 58–65. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-31-1-58-65. – EDN DHFLOI.

© О. Б. Завьялова, Р. А. Завьялов

### Ссылка для цитирования:

Завьялова О. Б., Завьялов Р. А. Способы усиления одноэтажного промышленного здания, оборудованного мостовым краном, при защите от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 1 (47). С. 5–10.