



(24)-0408-1

## МЕТАЛЛОЕМКОСТЬ РАМНО-СВЯЗЕВЫХ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ЗАЩИТЕ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

Миронов Андрей Николаевич<sup>1</sup>, Горохов Евгений Васильевич<sup>2</sup>,  
Оленич Елена Николаевна<sup>3</sup>, Парасюк Кирилл Витальевич<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

<sup>1</sup>a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>2</sup>mk@donnasa.ru, <sup>3</sup>e.n.olenich@donnasa.ru, <sup>4</sup>kir19072001@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается оценка металлоемкости стального каркаса при его расчете в рамках упругих деформаций без учета прогрессирующего обрушения, оценка металлоемкости каркаса при расчете с учетом прогрессирующего обрушения, сравнение влияния на металлоемкость методик расчета на прогрессирующее обрушение (статическая, квазистатическая и динамическая постановка). Исследования направлены на определение алгоритма расчета на прогрессирующее обрушение с учетом действующих нормативных документов для трех методов расчета, и на оценку влияния данных методов на металлоемкость несущих конструкций каркаса. В результате исследований была оценена металлоемкость каркаса при расчете в упругой постановке без учета прогрессирующего обрушения; металлоемкость при учете прогрессирующего обрушения тремя, приведенными в нормативных документах методами расчета. Научная новизна состоит в исследовании влияния методов расчета на прогрессирующее обрушение и металлоемкость многоэтажных зданий, а также оценке их безопасности и экономичности. Выполненные исследования являются важным шагом в области расчета стальных каркасов многоэтажных зданий с учетом прогрессирующего обрушения различными методами, ввиду недостаточного количества на данный момент публикаций и исследований в данной области.

**Ключевые слова:** стальной каркас, напряженно-деформированное состояние (НДС), прогрессирующее обрушение (ПО), металлоёмкость, монтажные стадии, квазистатический метод, динамический метод, коэффициент динамичности, время отказа

**Для цитирования:** Металлоемкость рамно-связевых стальных каркасов многоэтажных зданий при защите от прогрессирующего обрушения / А. Н. Миронов [и др.]. // *Металлические конструкции*. 2024. Том 30, № 4. С. 93–110. doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.4. edn: bvuiup

Original article

## METAL CONSUMPTION OF FRAME-BONDED STEEL FRAMES OF MULTI-STOREY BUILDINGS WHEN PROTECTING AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE

Andrey N. Mironov<sup>1</sup>, Yevgen V. Gorokhov<sup>2</sup>, Elena N. Olenich<sup>3</sup>, Kirill V. Parasyuk<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

<sup>1</sup>a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>2</sup>mk@donnasa.ru, <sup>3</sup>e.n.olenich@donnasa.ru, <sup>4</sup>kir19072001@mail.ru

**Abstract.** The article considers the assessment of the metal content of a steel frame when calculating it within the framework of elastic deformations without taking into account progressive collapse, the assessment



of the metal content of the frame when calculating taking into account progressive collapse, a comparison of the impact on the metal content of calculation methods for progressive collapse (static, quasi-static and dynamic formulation). The research is aimed at determining the calculation algorithm for progressive collapse, taking into account the current regulatory documents for the three calculation methods, and to assess the impact of these methods on the metal content of the supporting structures of the frame. As a result of the research, the metal consumption of the frame was estimated when calculating in an elastic formulation without taking into account progressive collapse; metal consumption when taking into account progressive collapse by three calculation methods given in regulatory documents. The scientific novelty consists in the study of the influence of calculation methods on the progressive collapse and metal consumption of multi-storey buildings, as well as the assessment of their safety and efficiency. The research performed is an important step in the field of calculating steel frames of multi-storey buildings, taking into account the progressive collapse by various methods, due to the insufficient number of publications and research in this field at the moment.

**Keywords:** steel frame, stress-strain state, progressive collapse (PC), metal consumption, installation stages, quasi-static method, dynamic method, coefficient of dynamism, failure time

**For citation:** Metal consumption of frame-bonded steel frames of multi-storey buildings when protecting against progressive collapse / A. N. Mironov [et al.]. *Metal Constructions*. 2024;30(2): 93–110. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.4. edn: bvuiup

## Введение

С проблемой ПО ученый мир столкнулся после трагедии 16 мая 1968 года, в Великобритании, когда произошло обрушение секции 22-х этажного здания, в результате взрыва бытового газа на одном из верхних этажей. После этого события многие страны стали разрабатывать нормативные документы, регулирующие методы расчёта и меры защиты от ПО.

В Российской Федерации основным документом, регулирующим методы защиты и расчета при ПО, является СП 385.1325800.2018 [1]. Данный документ определяет основные положения по проектированию зданий и сооружений классов КС-2 и КС-3 (нормальный и повышенный уровни ответственности), и определяет само понятие прогрессирующее обрушение. Самим же предполагаемым начальным локальным разрушением считается: «Удаление несущего конструктивного элемента, имитирующее потерю несущей способности и (или) устойчивости, а также приводящее к изменению конструктивной и расчетной схем здания и сооружения.» [1, с. 4].

ПО может произойти вследствие: террористических актов, взрывов бытового газа, попадания снарядов, столкновений автотранспорта с несущими конструкциями, что, к сожалению, в настоящее время случается не так уж и редко. При этом, характер разрушения несущих и

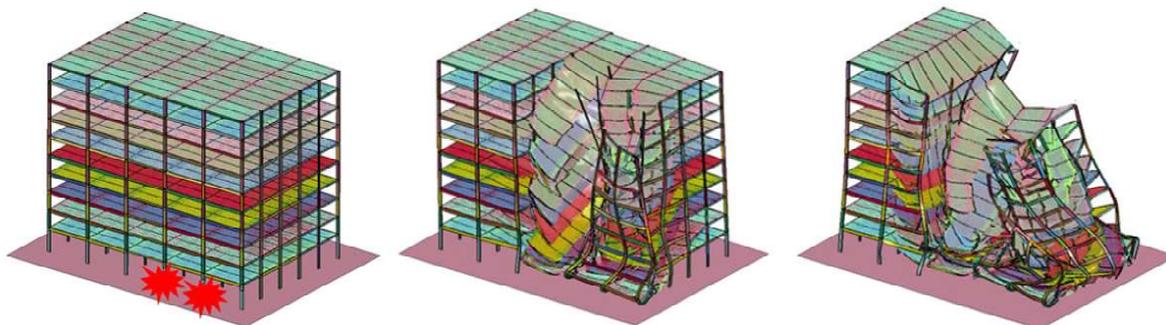
ограждающих конструкций является весьма типичным: ригели перекрытий и стеновые конструкции смещаются и падают на нижележащие строительные конструкции, передавая на них динамические нагрузки, что и вызывает лавинообразное обрушение конструкций на всех этажах.

На рисунке 1 наглядно показан процесс ПО стального каркаса 10-ти этажного здания вследствие разрушения двух колонн нижнего этажа, что приводит к обрушению большей части здания.

В действующем СП [1] согласно разделу 8 имеется три варианта расчета устойчивости к ПО:

- расчет в статической постановке;
- расчет кинематическим методом теории предельного равновесия;
- расчет в динамической постановке.

В соответствии с требованиями раздела 5 [1], указывается, что расчетные характеристики материалов принимаются в соответствии с действующими нормативными документами для материалов конструкций с их нормативными значениями. Деформационные характеристики материалов принимают нелинейными в соответствии с Приложением К [1] и соответствующими разделами нормативных документов для материалов конструкций.



**Рисунок 1.** Прогрессирующее обрушение каркаса 10-ти этажного здания [2].

Значения нагрузок при расчете устойчивости к ПО принимают в соответствии с нормативными документами по нагрузкам и воздействиям. Расчет производится на особое сочетание нагрузок, в которые входят постоянные, временные длительные и пониженные (через долю длительности) значения временных кратковременных нагрузок. При этом, коэффициенты надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и сочетаний нагрузок  $\psi$  принимают равными 1,0.

В основе расчетных методов, заложенных в [1], лежит дифференцирование расчетных схем на так называемые «первичную» и «вторичную» расчетные схемы. Сам же алгоритм расчета подразумевает создание первичной расчетной схемы, с приложенными нагрузками для условий нормальной эксплуатации и определением НДС конструкций. При этом расчет выполняется с учетом монтажных стадий, расчетными значениями прочностных характеристик на основное сочетание нагрузок. Затем происходит удаление (выключение) одного из вертикальных или горизонтальных несущих элементов и формируется вторичная расчетная схема, с нагрузками особых сочетаний. Значение нагрузок и прочностных характеристик материалов принимается с нормативными значениями.

Также стоит заметить то, что в зарубежных странах имеются свои нормативные документы, регулирующие расчет на ПО. В Великобритании был разработан нормативный документ [3], согласно которому здания разделяют на четыре класса: 1; 2А; 2В и 3. В действующих нормативных документах США – [4] и [5], требования к проектированию зданий и сооружений зависят

от категории риска объекта, и учитывают три подхода к обеспечению устойчивости конструкций зданий к лавинообразному обрушению. Европейские нормы [6] являются наиболее близкими к нашим, отечественным нормам, по подходу к мерам защиты. Одним из основных вариантов защиты является введение вертикальных и горизонтальных связей по колоннам и перекрытиям, что позволяет связать конструкции водоедино и перераспределять усилия от поврежденных элементов к целым.

В целом, можно сказать, что принятые подходы в зарубежных и отечественных нормах являются весьма близкими по смыслу и решаемым задачам. Различаются в основном подразделение на категории и принятые в соответствии с категориями способы защиты зданий и сооружений.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Исследованиями устойчивости и НДС строительных конструкций при лавинообразном ПО занимались многие ученые. Одной из работ, представляющей решение и исследования по данной теме, является работа А. Г. Тамразяна [7], в которой автор рассмотрел вопрос оценки ресурсов живучести – прочности и устойчивости высотных и сверхвысотных зданий при изменениях расчетной схемы и внезапных структурных перестройках несущих конструкций таких зданий. В работе [8] была сформулирована концепция управления процессом разрушения строительных конструкций в чрезвычайной (аварийной) ситуации при помощи двух групп методов: превентивных и оперативных. В работе В. М. Ройтмана [9] были

рассмотрены два основных подхода к проектированию защиты объектов от ПО: первый подход, не допускающий ПО, и второй – обеспечивающий сопротивление конструкций объекта в условиях «аварийной проектной ситуации» в течение определенного промежутка времени до начала обрушения. В работе Б. Н. Ягнюка [10] рассматриваются вопросы изучения международных стандартов, в частности Еврокодов, с целью адаптации вопросов повышения устойчивости стальных каркасов зданий различного назначения в аварийных ситуациях. В статье И. А. Самохвалова и В. И. Ерофеева [11] были показаны аналитический и численный методы исследования с использованием современных программных систем, базирующихся на МКЭ. Публикация Д. С. Бурдина [12] внесла весомый вклад в решение проблематики методик расчета зданий и сооружений на устойчивость к ПО. В работе [13] Н. А. Басалаевым проанализированы новейшие мировые исследования и показаны противоречия и неточности в требованиях действующей нормативной документации, а также расхождения с реальной работой каркаса здания при ПО. В работе [14] производится анализ и сравнение национальных и зарубежных норм. Статьи [10, 11] расширяет и продолжает работа Н. Б. Андросовой и О. А. Ветровой [15], в которой рассмотрены методы защиты от ПО по трем основным категориям: меры вторичной защиты, косвенное и прямое проектирование. В работе [16] была рассмотрена проблема оценки устойчивости высотных зданий к ПО, выполнен анализ существующих методик по расчету каркаса здания на ПО и даны рекомендации по повышению несущей способности элементов каркаса при аварийных воздействиях.

Большинство вышеприведенных работ рассматривают необходимость улучшения и уточнения существующих методик расчета, а некоторые, предлагают весьма новаторские и эффективные методы защиты.

Работа С. М. Григоршева [17] продемонстрировала важные вопросы различия подходов к проектированию высотных зданий в РФ и зарубежных странах, необходимость внедрения новых методов расчета и оценки прочности и устойчивости стальных каркасов, важность учета изменения НДС несущих конструкций с учетом стадий монтажа и особенностей эксплуатации зданий.

Помимо рассмотренных выше исследователей, выделяются также работы Д. В. Гранкина, Абу-Хасан М. С., В. И. Колчунова, Э. Н. Кодыша, В. И. Травуша, К. А. Тихановой, С. В. Гвоздева, А. В. Окунева, Т. К. Ксенофонтовой, А. С. Сарражинского, Г. М. Кравченко. Детально процесс моделирования и расчета на ПО с применением ПК SCAD изложен в работах О. Б. Завьяловой.

Среди иностранных исследователей следует выделить работы: U. Starossek [18], H. Helmy и H. Salem [19], J. Adam [20], Gordon [21], Meng-Hao Tsai [22], Ahmadi [23], M. Alanani и H. Salem [24]. Зарубежные работы больше посвящены непосредственному исследованию методик на практике, нежели чисто в теоретическом анализе норм или сравнении различных способов и мер защиты на ПО.

Следует отметить, что на данный момент практически нет работ, исследующих достоверность методик расчета, и мер защиты, предложенных в СП [1].

### Целью исследований

является оценка металлоемкости стального каркаса при расчете в рамках упругих деформаций без учета ПО, оценка металлоемкости каркаса при расчете с учетом ПО, сравнение влияния на металлоемкость методик расчета на ПО (статическая, квазистатическая и динамическая постановка).

### Основная часть

#### 1. Объект исследования

В качестве исследуемой модели был выбран рамно-связевой каркас 20-ти этажного здания с подвалом. Принятая сетка колонн в продольном и поперечном направлениях – 6,0×6,0м, высота этажей  $h = 3,3$  м. Каркас представляет собой поперечные рамы с жестким примыканием ригелей к колоннам, объединенные распорками для уменьшения расчетной длины колонн из плоскости рам, с перекрытиями, выполненными с применением второстепенных балок, шарнирно-опертых на ригели. В качестве поперечных сечений для колонн, ригелей и второстепенных балок были приняты двутавры по СТО АСЧМ 20-93. Конструкция перекрытия состоит из железобетонной плиты, общей толщиной 175 мм, выполненной

по несъемной опалубке из профнастила Н75-750–0,9 по ГОСТ 24045-2 016. Профнастил опирается на второстепенные балки сверху. По периметру здания предусмотрены контурные балки, служащие одновременно связевыми распорками рам из их плоскости. Фундамент здания представляет собой монолитную железобетонную плиту, толщиной 1 200 мм. Место строительства для определения ветровых и снеговых нагрузок принят – г. Ростов-на-Дону. Размеры здания в крайних осях «1-15» и «А-М» составляют 36×30 м.

Схематический план здания представлен на рисунке 2. Цветовая схема расположения элементов перекрытия представлена на рисунке 3.

В исследованиях применена каркасно-стволовая конструктивная система, при которой стальной каркас работает совместно с монолитным железобетонным стволом/ядром жесткости, что позволяет значительно повысить жесткость каркаса на горизонтальные нагрузки, а также при реальном проектировании расположить

шахты коммуникаций и лестнично-лифтовой узел (ЛЛУ) в несгораемом ядре жесткости, что удовлетворяет противопожарным требованиям.

Моделирование расчетной схемы и расчет здания производился в ПК «ЛИРА 2022R1». Расчетная схема состоит из 228 897 узлов и 269 908 элементов. Ригели, колонны, распорки и связи моделировались стержневыми КЭ. Плиты перекрытия, покрытия, и фундаментная плита, стены монолитного ядра жесткости ЛЛУ, подпорные стены подвала моделировались КЭ оболочки, с разбивкой КЭ – сеткой 300×300 мм. Шарнирные узлы примыкания распорок, балок, связей моделировались созданием шарниров UY, UZ на концах конструктивных элементов. Общий вид расчетной схемы представлен на рисунке 4.

Перекрытие, выполненное из ж. б. плиты по профнастилу, уложенному поверх второстепенных балок, моделировалось путем триангуляции плиты сеткой КЭ-оболочек 300×300 (мм), с перемещением относительно уровня балок на 200 мм

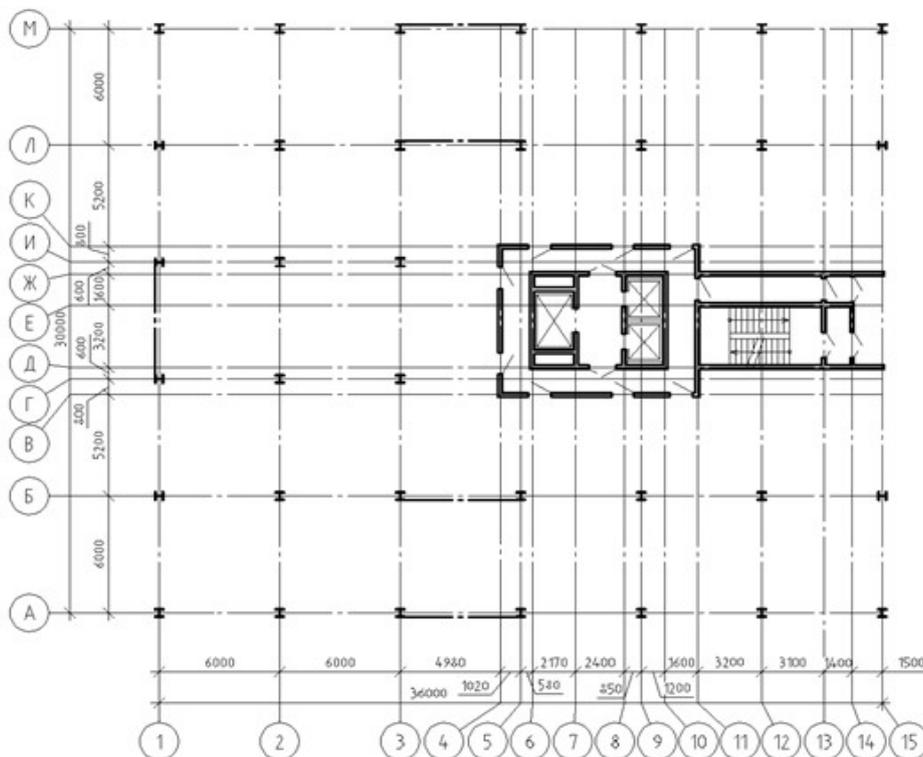


Рисунок 2. Схематический план здания на отм. 0,000.

вверх (по оси Z) и объединением в абсолютно жесткое тело (АЖТ) соответствующих узлов балок и плит.

КЭ фундаментной плиты назначались коэффициенты постели/упругого основания  $C_z$ , которые определялись в системе «Грунт», реализованной в ПК «Лира 2021R1».

Задание нагрузок на плиты покрытия и перекрытия производилось путем введения распределенных нагрузок на стержни, моделирующие балки настила. Задание средней составляющей основной ветровой нагрузки производилось на стержневые элементы колонн и торцы стен ЛЛУ по высоте. На основании средней составляющей основной ветровой нагрузки производился расчет модели здания на пульсации ветра с динамическими массами, состоящими из вертикальных нагрузок. В первом приближении были созданы

15 нагрузок/загружений: постоянная от собственного веса МК, ЖБК, веса ограждающих конструкций и полов; постоянная от бокового давления грунта; временная длительная от веса перегородок; полезная кратковременная на перекрытия, действующая на все пролёты; полезная кратковременная на перекрытия, действующая на нечетные пролёты; полезная кратковременная на перекрытия, действующая на четные пролёты; кратковременная снеговая; средняя составляющая ветровой нагрузки, действующая вдоль оси X; средняя составляющая ветровой нагрузки, действующая против оси X; средняя составляющая ветровой нагрузки, действующая вдоль оси Y; средняя составляющая ветровой нагрузки, действующая против оси Y; пульсации ветра, действующие вдоль оси X; пульсации ветра, действующие против оси X; пульсации

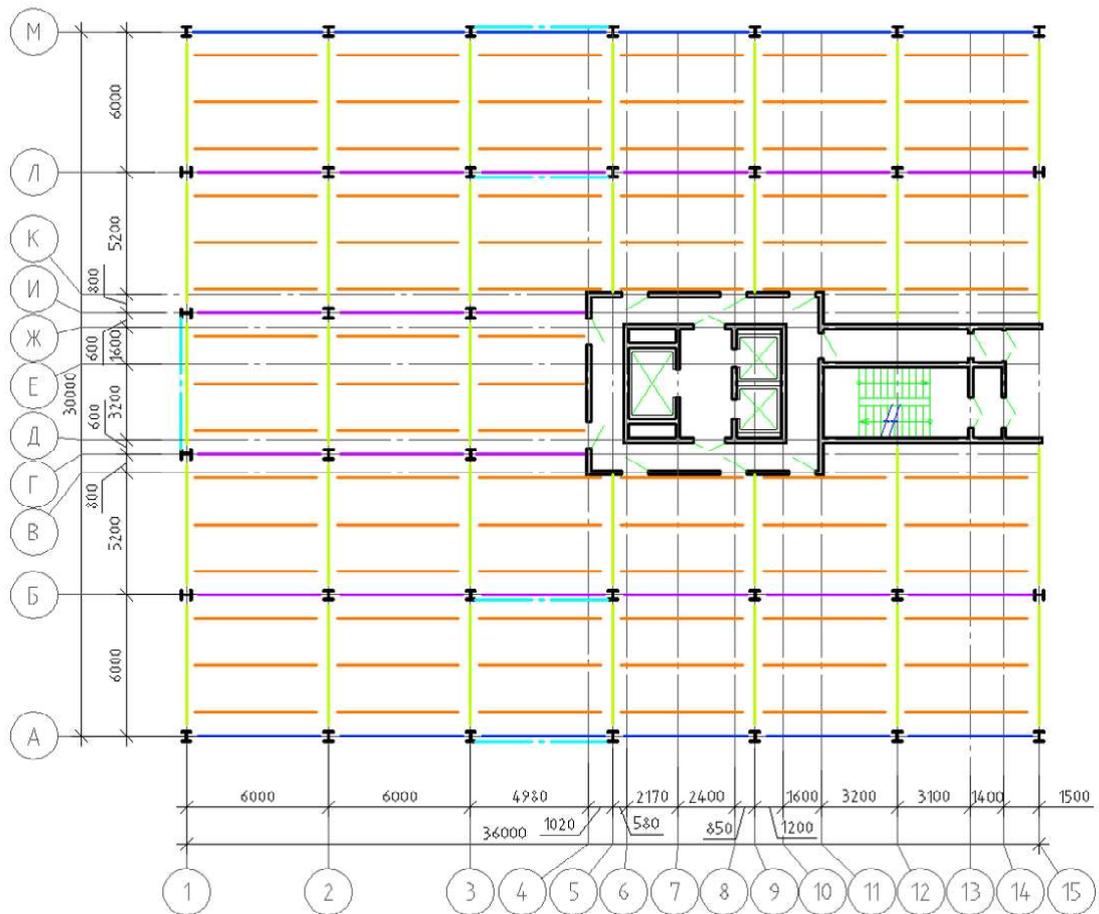
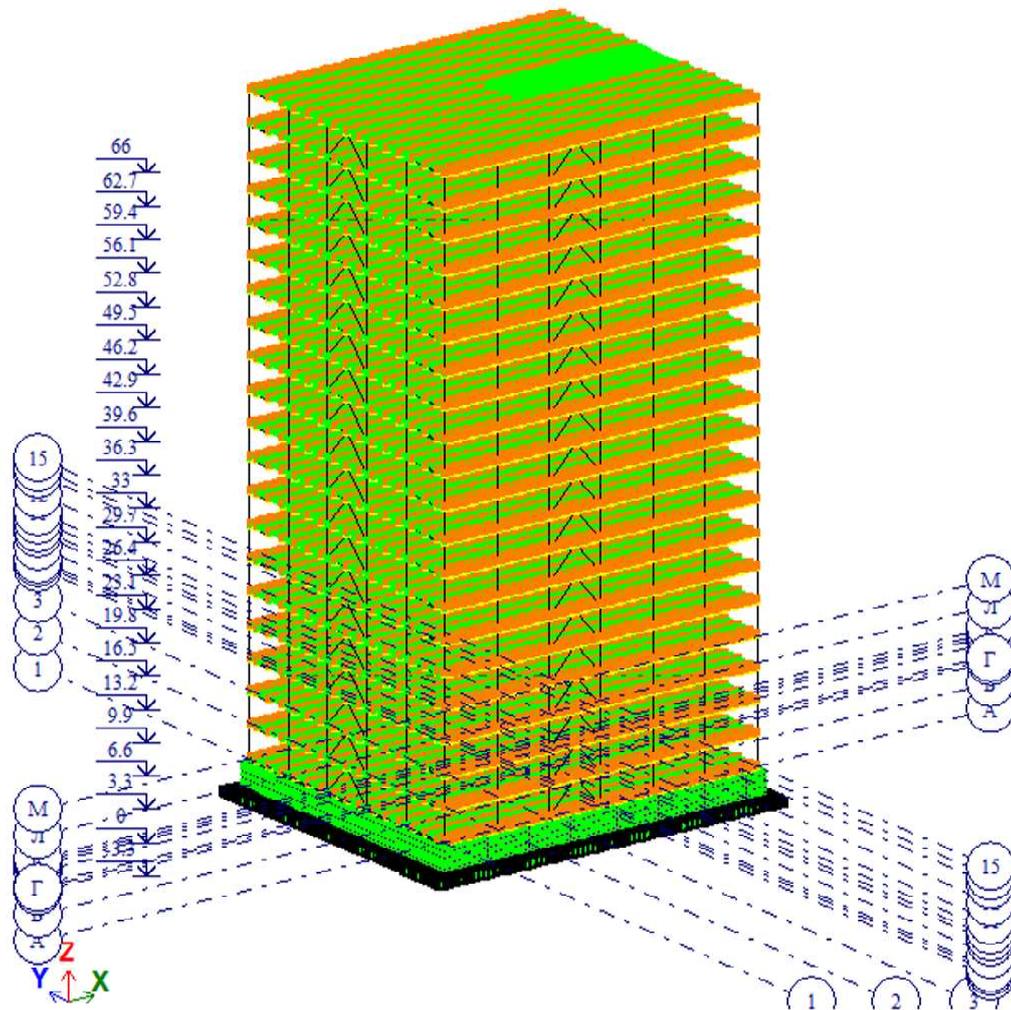


Рисунок 3. Цветовая схема расположения элементов перекрытия.



**Рисунок 4.** Общий вид расчетной схемы здания.

ветра, действующие вдоль оси  $Y$ ; пульсации ветра, действующие против оси  $Y$ .

По итогам предварительного упругого расчета модели здания в ПК «ЛИРА 2022R1» выполнялся предварительный подбор поперечных сечений элементов каркаса, который приведен в таблице 1.

Для собранной расчетной схемы производился статический расчет в линейной постановке при упругой работе материала, результатом которого являлось уточнение поперечных сечений элементов каркаса здания, изменение применяемого сортамента для колонных двутавров и уточнение коэффициентов расчетных длин колонн. По итогам расчета выполнен подбор попе-

речных сечений и оценена металлоемкость каркаса при расчете в линейной упругой постановке, составившая 1 386,81 т, что составляет 18,53 кг/м<sup>3</sup> и 61,1 кг/м<sup>2</sup> в пересчете на 1 м<sup>3</sup> объема и 1 м<sup>2</sup> площади здания соответственно.

## 2. Моделирование вторичной расчетной схемы высотного здания и расчет статическим методом в системе автоматизированного проектирования «ЛИРА 2022R1»

Так как СП [1] указывает на необходимость поэтапного расчета, в исследованиях на ПО вводились в существующую схему монтажные стадии. В расчетах на ПО использованы параметры

физической, геометрической и конструктивной нелинейности. Монтажные стадии назначались в рамках одного этажа, в данном случае – 21 стадия. На каждой стадии, в рамках соответствующего этажа назначалась нагрузка от собственного веса МК и ЖБК, с соответствующими коэффициентами надежности по нагрузке  $\gamma_f$ . Мозаика постадийно смонтированных элементов представлена на рисунке 5.

Результаты расчета имеют высокую сходимость. Сечения, подобранные расчетом без монтажных стадий, удовлетворяют расчету с учетом монтажных стадий. В результате данного сравнения можно сделать вывод о корректности назначенных сечений в рамках линейного упругого расчета, и верности учета монтажных стадий.

В соответствии с разделом 7 [1] в расчетной схеме целесообразно учитывать физическую (пластичность, ползучесть) и конструктивную нелинейность. Последняя учтена при помощи модуля «Монтаж», физическая нелинейность учитывалась с использованием реальной диаграммы деформирования материалов по разделу 7 [1] в виде кривой OACDEF (рисунок 6) для 3-го класса НДС (с учетом пластической работы).

Для построения диаграммы в расчетной схеме выполнялась смена типа КЭ для стержневых элементов колон, ригелей и балок с КЭ-10 (универсальный пространственный стержневой) на

КЭ-410 (универсальный пространственный стержневой, с учетом физической и геометрической нелинейности). В параметрах сечения учитывалась физическая нелинейность в виде кусочно-линейного закона деформирования.

В соответствии с указаниями раздела 6 [1] при расчете на ПО ветровые нагрузки не учитывались, а постоянные и временные длительные нагрузки учитывались как нормативные.

Рассматриваемая расчетная схема здания является симметричной относительно центральных рядов «Д» и «Ж», в связи с этим, выбор удаляемых колонн для расчета на ПО сокращается в 2 раза. Дальнейшее конструирование (изменение сечений) производилось зеркально для элементов относительно оси симметрии. В качестве демонтируемых на последней стадии шагов истории загрузений были выбраны 4 колонны в осях: А-1, А-15 – как угловые, Г-1, Б-3 – как наиболее нагруженные, входящие в состав связевого блока.

Расчет выполнялся статическим методом, при котором производится удаление выбранных конструктивных элементов и расчет схемы без них, а также без дополнительных нагрузок. Результаты расчета при отказе колонны «А-1» по двум группам предельных состояний приведены на рисунке 7. В результате расчета статическим методом, выявлена необходимость корректировки сечений в сторону увеличения: связей Вс-2

Таблица 1. Предварительные поперечные сечения элементов модели здания.

Элемент	ГОСТ	Сечение	Марка стали/Класс бетона
Колонны К-1; К-2	Двутавры по СТО АСЧМ 20-93	I 40К4	С255Б
Ригели перекрытия и покрытия		I 45Б2	С255Б
Балки настила		I 25Б2	С255Б
Контурные балки		I 25Б1	С255Б
Распорки между колоннами Рс-1	Профиль «Молодечно» ГОСТ 30245-2003	Гн. 90×90×5	С245
Вертикальные связи между колоннами Вс-1		Гн. 90×90×5	С245
Вертикальные связи между колоннами Вс-2		Гн. 90×90×5	С245
Монолитная фундаментная плита	–	Н = 120 см	В30
Подпорная стенка подвала	–	Н = 40 см	В30
Стены монолитного ядра жесткости	–	Н = 25 см	В25
Монолитные плиты перекрытия по профнастилу	–	Н = 10 см	В30

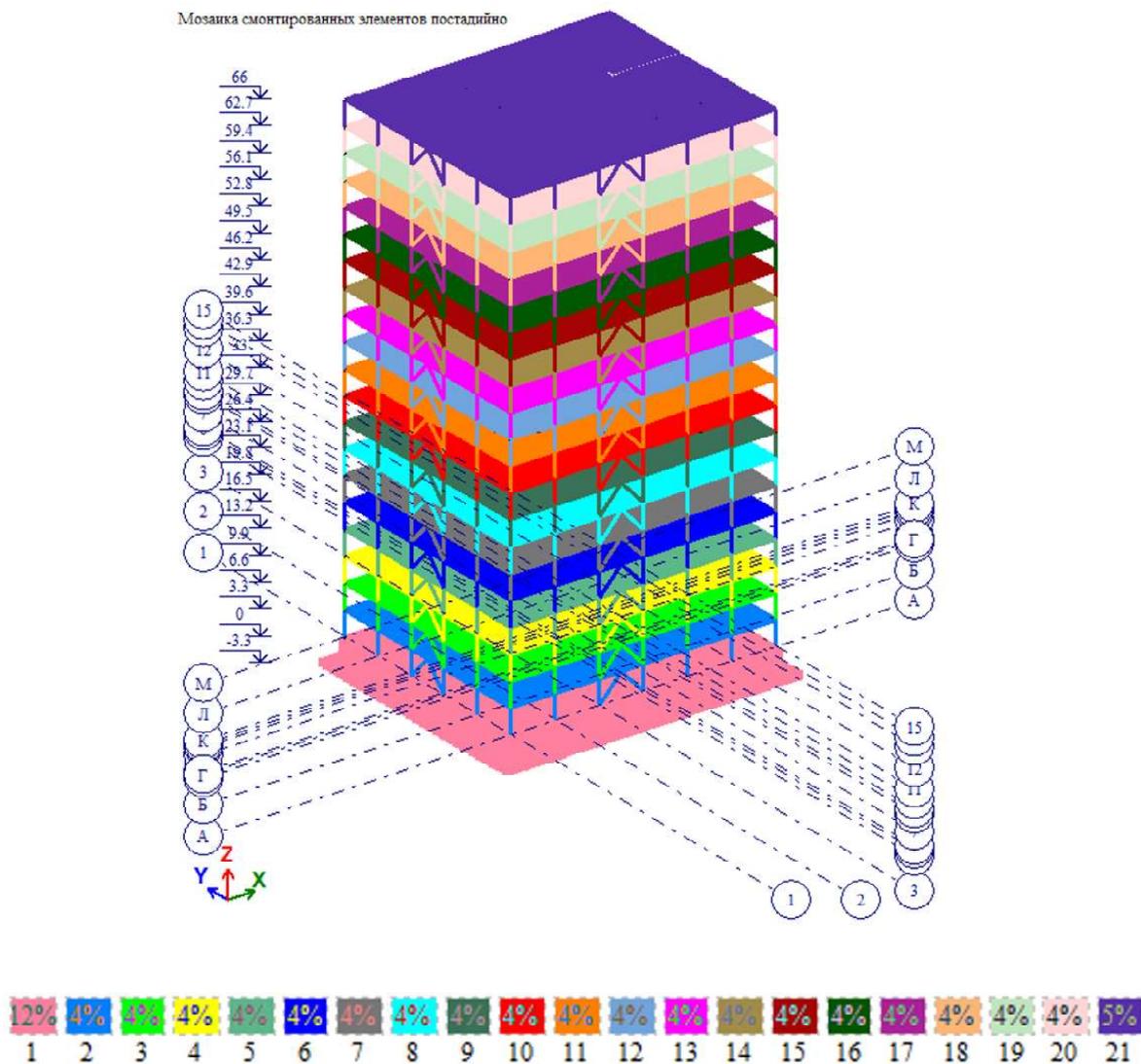


Рисунок 5. Мозаика поэтапно смонтированных элементов каркаса здания.

на высоту до 4-х этажей; горизонтальных рас-  
порок между колоннами Рс-1 на ту же высоту; 6-ти  
ригелей Р-1 на отм. 0,000.

При расчете модели в физически и геомет-  
рически нелинейной постановке на ПО стати-  
ческим методом (расчет с удалением конструк-  
ций, без добавочных нагрузок), с учетом поло-  
жений СП [1], были подобраны поперечные се-  
чения элементов, определена металлоемкость ос-  
новных конструкций здания, составляющая 1 389,25 т (18,57 кг/м<sup>3</sup>). Таким образом, расчет  
на ПО статическим методом привел к увеличе-  
нию металлоемкости каркаса здания на 2,44 т,

что в процентном выражении составляет прирост  
+0,18 %. Можно утверждать, что расчет каркаса  
на ПО статическим методом приводит к весьма  
незначительному увеличению сечений, металло-  
емкости, и трудоемкости расчета.

*3. Исследование влияния ПО на  
металлоёмкость стального каркаса при  
квазистатическом и динамическом методе  
расчета*

Расчет на ПО квазистатическим методом, в отли-  
чие от статического метода, подразумевает не толь-  
ко удаление конструктивного элемента здания и

ния и расчет без него, но и определение усилий в конструктивном элементе до стадии его удаления, с целью приложения действующих в нем усилий, в виде нагрузки, с обратным знаком. Данное действие позволяет смоделировать мгновенность удаления несущей конструкции с соответствующим динамическим эффектом путем введения в расчет коэффициента динамичности  $K_d = 2$ .

Исходя из вышеизложенного, необходимо выполнить расчет модели здания с учетом всех требований [1], касаемо: прочностных парамет-

ров, величин нагрузок, учета нелинейности и т. д. Затем определить усилие в удаляемой колонне на крайней стадии перед её удалением, создать новую стадию демонтажа, и приложить определенное усилие в виде нагрузки с обратным знаком в узел, моделирующий оголовок колонны. После этого выполнить новый расчет с учетом новой стадии загрузки.

В расчетную схему был назначен коэффициент динамичности  $K_d = 2$  по направлению Z в верхний узел удаляемой колонны (рисунок 8).

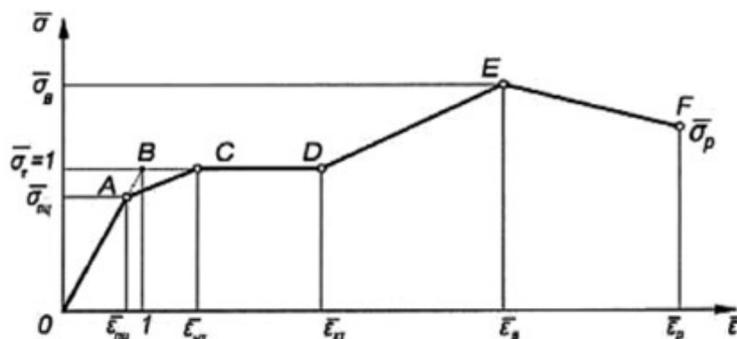


Рисунок 6. Обобщенная расчетная диаграмма работы строительных сталей.

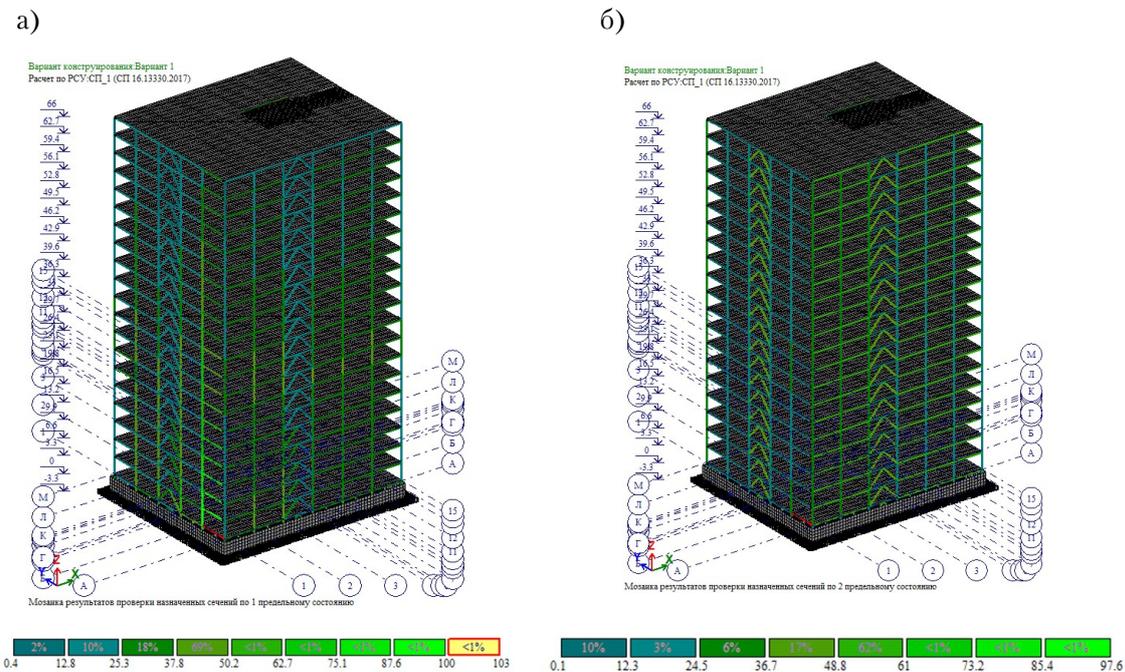


Рисунок 7. Отказ колонны А-1. Процент использования сечений до корректировки: а) первая группа предельных состояний (1ПС); б) вторая группа предельных состояний (2ПС).

Результат расчета схемы квазистатическим методом с отказом колонн: «А-1», «А-15», «Г-1» и «Б-3» приведен на рисунке 9 в виде огибающей цветовой эпюры результатов проверки сечений с использованием системы «Метеор».

Порядок расчета на ПО динамическим методом подразумевает определение частоты собственных колебаний системы после удаления колонны, с целью определения времени отказа конструкции и коэффициентов демпфирования по Релею. Это необходимо для учета затухания колебаний системы после отказа несущей конструкции. Затем для удаляемых колонн назначаются данные по времени отказа  $\partial T$ , коэффициенты демпфирования  $\alpha$ ,  $\beta$  для всей системы и производится расчет схемы.

Были определены частоты собственных колебаний системы после удаления каждой из колонн по отдельности. Для этого создавались четыре расчетные схемы, в которых изначально

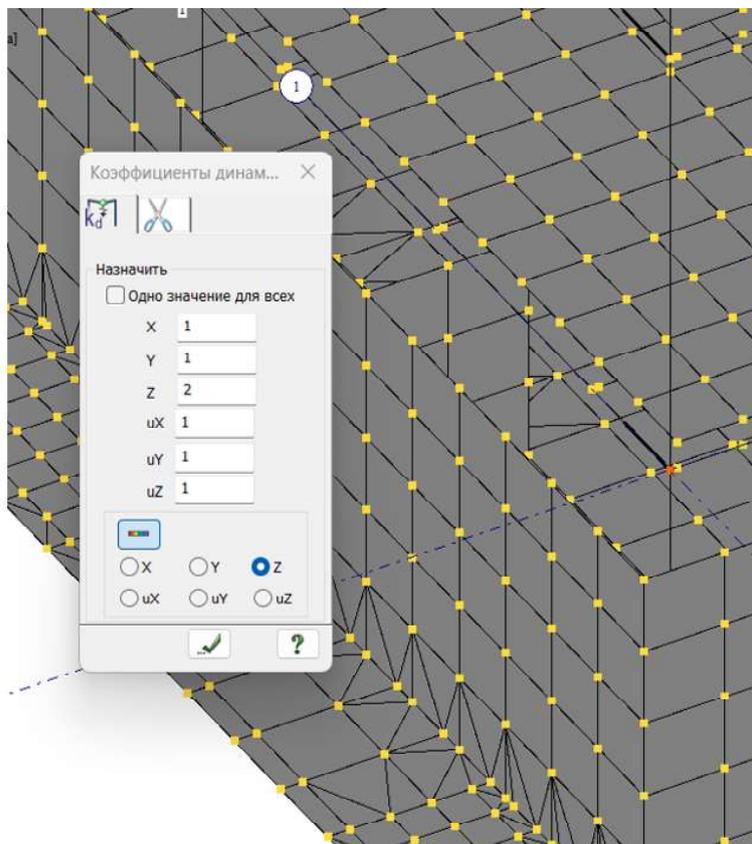
были удалены демонтируемые колонны и создано новое дополнительное нагружение с модальным анализом системы. Для дополнительного нагружения в виде модального анализа были собраны динамические массы от всех вертикальных нагрузок с коэффициентом 1,0, так как все нагружения в расчетной схеме при расчете на ПО являются нормативными.

Время отказа конструкции определялось по формуле:

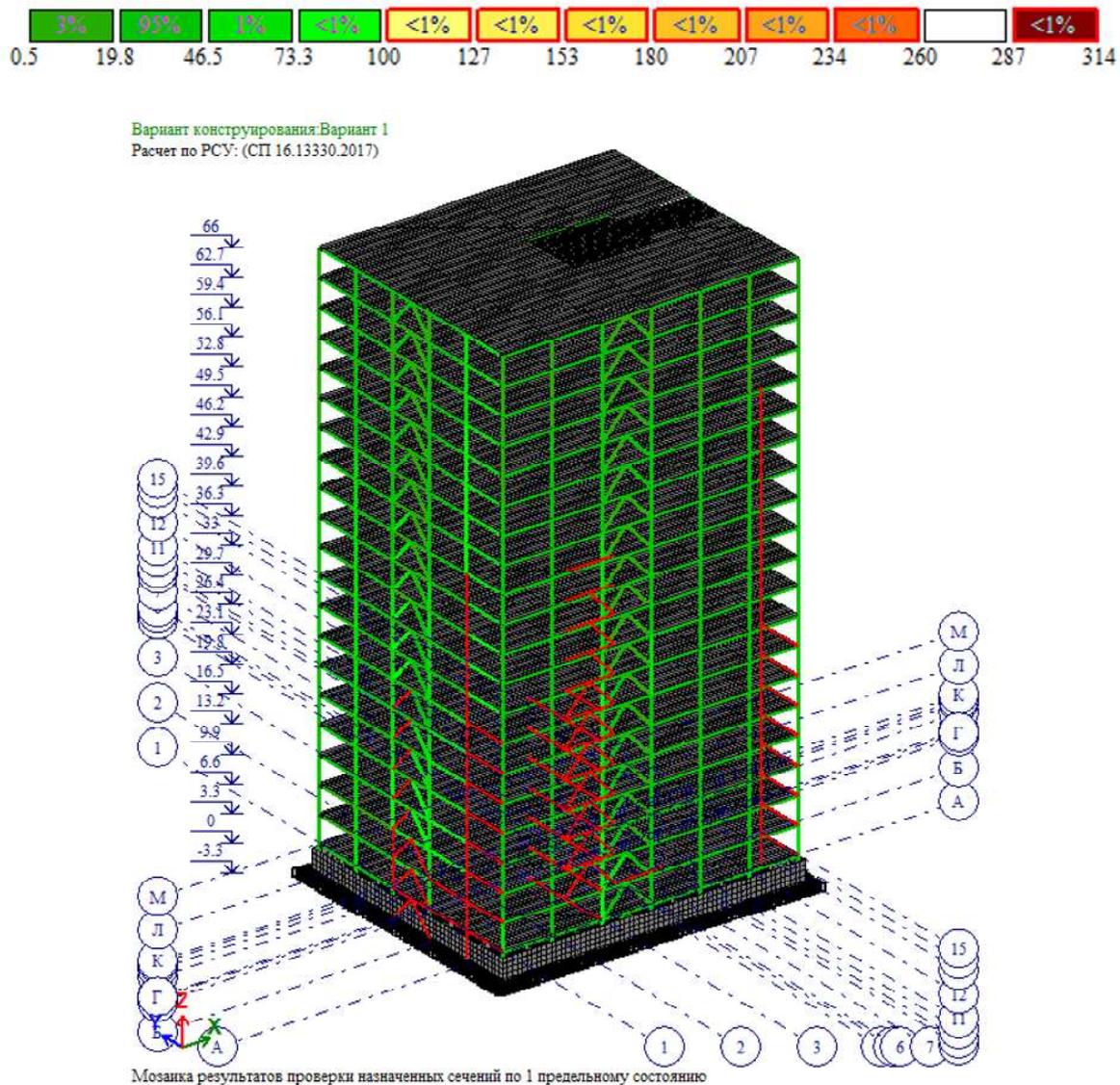
$$\partial T = 0,1T, \quad (1)$$

где  $T$  – период собственных колебаний системы, с.

Для определения времени отказа конструкции производился модальный анализ с определением форм колебаний в вертикальной плоскости, ассоциирующиеся с перемещением от удаления элемента. По периоду колебаний первой вертикальной формы определяется время отказа системы.



**Рисунок 8.** Ввод в расчетную схему коэффициента динамичности вдоль вертикального направления Z, в верхний узел удаляемой колонны.



**Рисунок 9.** Отказ колонн: «А-1», «А-15», «Г-1» и «Б-3». Огибающий процент использования сечений до корректировки по 1ПС.

На рисунке 10 приведены две первые вертикальные формы колебаний системы при удалении колонны «А-1».

Для определения коэффициентов демпфирования по Релею использовались круговые частоты первых двух вертикальных форм:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_1 \cdot \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (2)$$

где  $\xi = 0,05$  – параметр относительного демпфирования в соответствии с таблицей II.1 [25];

$\omega_1, \omega_2$  – круговые частоты первых двух вертикальных форм колебаний, рад/с;

$$\beta = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (3)$$

Расчет времени отказа конструкции, а также коэффициентов демпфирования по Релею  $\alpha$  и  $\beta$  при удалении колонн А-1, А-15, Г-1 и Б-3 приведен в таблице 2.

Результаты проверки подобранных в упругой стадии сечений элементов каркаса при расчете динамическим методом (удаляется колонна

Таблица 2. Определение времени отказа конструкции и коэффициентов демпфирования  $\alpha$  и  $\beta$  по Релею

Удаляемая колонна	$\xi$	Период колебаний, Т, с	Круговые частоты, рад/с		Время отказа $\partial T$ , с	Коэффициенты демпфирования по Релею	
			$\omega_1$	$\omega_2$		$\alpha$	$\beta$
А-1	0,05	0,551	11,395	12,880	0,055	0,605	0,004
А-15	0,05	0,553	11,369	13,125	0,055	0,609	0,004
Г-1	0,05	0,550	11,423	13,075	0,055	0,610	0,004
Б-3	0,05	0,553	11,365	14,283	0,055	0,633	0,0039

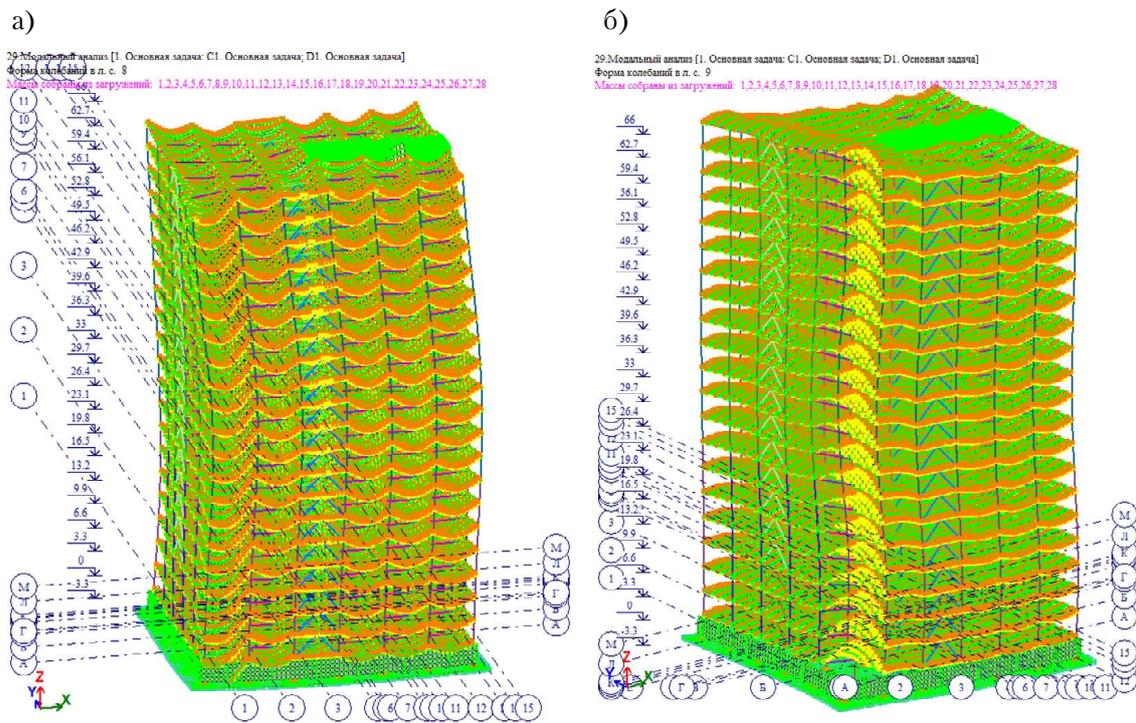


Рисунок 10. Формы колебаний системы в вертикальной плоскости при отказе колонны «А-1»: а) 8-я форма колебаний; б) 9-я форма колебаний.

А-1) представлены на рисунке 11. По результатам проверки была выявлена необходимость корректировки множества элементов расчетной схемы.

По результатам расчета рамно-связевого каркаса здания в физически и геометрически нелинейной постановке на ПО квазистатическим методом, были подобраны поперечные сечения элементов и определена металлоемкость основных конструкций здания, составляющая 1 448,03 тонн (19,35 кг/м<sup>3</sup>).

При расчете в физически и геометрически нелинейной постановке на ПО динамическим

методом, металлоемкость основных конструкций здания составила 1 396,76 т (18,66 кг/м<sup>3</sup>). Таким образом, расчет на ПО квазистатическим методом привел к увеличению металлоемкости каркаса здания на 61,22 т, что составляет прирост к металлоемкости без учета ПО на +4,42 %.

Расчет на ПО динамическим методом привел к увеличению металлоемкости каркаса здания на 9,95 т, что составляет прирост к металлоемкости без учета ПО на +0,72 %.

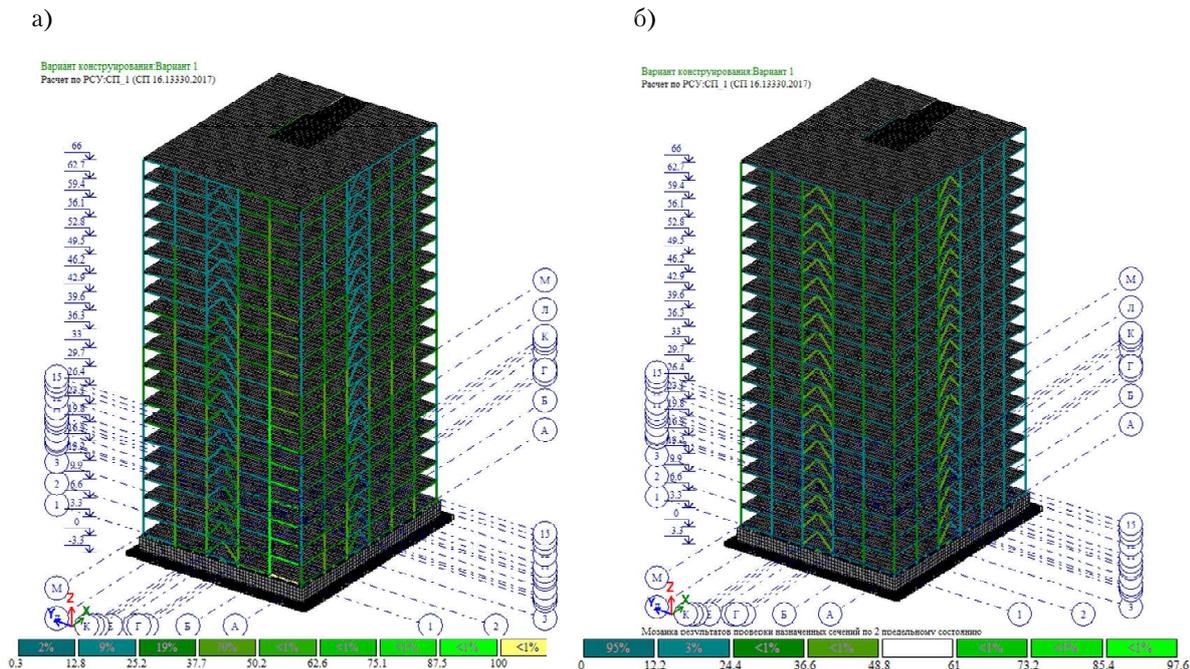


Рисунок 11. Отказ колонны А-1. Процент использования сечений до корректировки: а) 1ПС; б) 2ПС.

## Выводы

1. Установлен прирост металлоемкости схемы, составивший 0,18, 0,72 и 4,42 % при расчете здания с учетом ПО тремя методами: статическим, динамическим и квазистатическим соответственно. Металлоемкость каркаса при этом составила: 1 389,25 тонн (18,57 кг/м<sup>3</sup>), 1 396,76 тонн (18,66 кг/м<sup>3</sup>) и 1 448,03 тонн (19,35 кг/м<sup>3</sup>). В качестве сопоставительного значения была определена металлоемкость конструкций здания без учета ПО, составившая 1 386,81 т (18,53 кг/м<sup>3</sup>), величина которой соответствует рекомендациям по расходу стали на оптимизированные стальные кар-

касы, реализованные ООО «Кузнецкие металлоконструкции»;

2. Статический метод дает наибольшую экономическую выгоду (наименьший прирост расхода стали в пределах 0,2 %); квазистатический метод – наименее рациональную металлоемкость (прирост расхода стали в районе 5 %); динамический метод – является наиболее оптимальным (прирост в районе 0,8 %).
3. В связи с отсутствием в действующих нормативных документах точных указаний о выборе метода расчета на ПО, – назначение метода расчета остается на усмотрение проектировщика.

## Список источников

1. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения : издание официальное : (утвержден Приказом Минстроя России от 5 июля 2018 г. № 393/пр и введен в действие с 6 января 2019 г. : введен впервые : дата введения 2019-01-06 / исполнители Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВО

## References

1. SP 385.13258.2018. Protection of buildings and structures from progressive collapse : official publication : approved by the Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation № 393/pr of July 5, 2018 : and entered into force on January 6, 2019 : introduced for the first time : date of introduction 2019-01-06 / executors Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Southwestern State University» (FGBOU VO «South State University»), Joint

- «ЮЗГУ»), Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Закрытое акционерное общество Городской проектный институт жилых и общественных зданий (ЗАО «ГОРПРОЕКТ») [и др.]. – Москва : Стандартиформ, 2021. – 29 с. – Текст : непосредственный.
2. Прогрессивное моделирование коллапса. – Текст : электронный // Шериф Эль-Тавиль : [сайт]. – 2022. – URL: <http://www-personal.umich.edu/~eltawil/> (дата обращения 06.04.2024).
  3. UK Building regulations: Approved document A. – London : British Standard Institute, 2013. – 49 p. – Текст : непосредственный.
  4. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. – USA : Department of defense, 2016. – 245 p. – Текст : непосредственный.
  5. Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance : general services administration : October 24, 2013 : Revision 1 : January 28, 2016. – USA : [s. n.], 2016. – 203 p. – Текст : непосредственный.
  6. BSEN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7. General actions. Accidental actions : British Standards : this European Standard supersedes ENV 1991-2-7:1998. – Brussels : BSI, 2006. – 69 p. – Текст : непосредственный.
  7. Тамразян, А. Г. Ресурс живучести – основной критерий проектных решений высотных зданий / А. Г. Тамразян. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
  8. Данилов, А. И. Концепция управления процессом разрушения строительного объекта / А. И. Данилов. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 8. – С. 74–77.
  9. Ройтман, В. М. Нормирование и проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: основные подходы / В. М. Ройтман. – Текст : непосредственный // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 45–51.
  10. Ягнюк, Б. Н. Расчет каркасов зданий на прогрессирующее обрушение / Б. Н. Ягнюк. – Текст : непосредственный // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 05–06 апреля 2018 года. – Новополоцк : Учреждение образования «Полоцкий государственный университет» Установа адукацыі «Палацкі дзяржаўны ўніверсітэт», 2018. – С. 116–122.
  11. Самохвалов, И. А. Расчет на прогрессирующее обрушение многофункционального высотного здания в г. Москве / И. А. Самохвалов, В. И. Ерофеев. – Текст : непосредственный // XXV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, гуманитарные науки) : материалы Stock Company «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdaniy» (JSC «Tsniipromzdaniy»), Closed Joint Stock Company City Design Institute of Residential and Public Buildings (CJSC GORPROEKT) [and others]. – Moscow : Standartinform, 2021. – 29 p. – Text : direct. (in Russian)
  2. Progressive modeling of collapse. – Text : electronic // Sherif El-Tawil : [website]. – 2022. – URL: <http://www-personal.umich.edu/~eltawil/> (date of access 23.06.2023). (in Russian)
  3. UK Building regulations: Approved document A. – London : British Standard Institute, 2013. – 49 p. – Text : direct.
  4. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. – USA : Department of defense, 2016. – 245 p. – Text : direct.
  5. Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance : general services administration : October 24, 2013 : Revision 1 : January 28, 2016. – USA : [s. n.], 2016. – 203 p. – Text : direct.
  6. BSEN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7. General actions. Accidental actions : British Standards : this European Standard supersedes ENV 1991-2-7:1998. – Brussels : BSI, 2006. – 69 p. – Text : direct.
  7. Tamrazyan, A. G. Survivability resource is the main criterion for design solutions of high-rise buildings. – Text : direct. – In: *Housing construction*. – 2010. – № 1. – P. 15–18. (in Russian)
  8. Danilov, A. I. The concept of managing the process of destruction of a construction object. – Text : direct. – In: *Industrial and civil construction*. – 2014. – № 8. – P. 74–77. (in Russian)
  9. Roitman, V. M. Rationing and design of protection of buildings and structures from progressive collapse: basic approaches. – Text : direct. – In: *Natural and man-made risks. Safety of structures*. – 2011. – № 2. – P. 45–51. (in Russian)
  10. Yagnuk, B. N. Calculation of building frames for progressive collapse. – Text : direct. – In: *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations* : collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University, Novopolotsk, 05–06 April 2018. – Novopolotsk : Educational institution «Polotsk State University» Institution of Education «Polatsky dzyarzhayny University», 2018. – P. 116–122. (in Russian)
  11. Samokhvalov, I. A.; Erofeev, V. I. Calculation of the progressive collapse of a multifunctional high-rise building in Moscow. – Text : direct. – In: *XXV Nizhny Novgorod session of young scientists* (technical, natural, humanitarian sciences): materials of abstracts and reports, Nizhny Novgorod, November 10–13, 2020. – Nizhny Novgorod : State Budgetary Institution of additional professional Education «Nizhny Novgorod Scientific and Information Center», 2020. – P. 127–131.

- тезисов и докладов, Нижний Новгород, 10–13 ноября 2020 года. – Нижний Новгород : Государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Нижегородский научно-информационный центр», 2020. – С. 127–131.
12. Бурдин, Д. С. Учет физической нелинейности при расчете зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению / Д. С. Бурдин. – Текст : электронный // Молодой ученый. – 2021. – № 21 (363). – С. 56–62. – URL: <https://moluch.ru/archive/363/81274/> (дата обращения: 06.04.2024).
  13. Басалаев, Н. А. Проектирование многоэтажных зданий с металлическим каркасом для повышения их сопротивления прогрессирующему обрушению / Н. А. Басалаев. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4(51). – С. 214.
  14. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования / И. И. Ведяков, П. Г. Еремеев, П. Д. Одесский [и др.]. – Текст : электронный // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 4. – С. 16–24. – DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24.
  15. Андросова, Н. Б. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза / Н. Б. Андросова, О. А. Ветрова. – Текст : электронный // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 1(81). – С. 85–96. – DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96.
  16. Данилова, К. А. Расчет стального каркаса одноэтажного здания на прогрессирующее обрушение / К. А. Данилова. – Текст : непосредственный // Вестник науки. – 2019. – Том 4, № 6(15). – С. 323–326.
  17. Григорьев, С. М. Исследование прочности и устойчивости к прогрессирующему обрушению высотных зданий равно-связевой конструктивной схемы в процессе возведения и эксплуатации : специальность 05.23.17 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григорьев Сергей Михайлович. – Астрахань, 2011. – 188 с. – Текст : непосредственный.
  18. Starossek, U. Progressive collapse of structures / U. Starossek. – London : Thomas Telford, 2009. – 153 p. – Текст : непосредственный.
  19. Helmy, H. Computer-aided assessment of progressive collapse of reinforced concrete structures according to GSA code / H. Helmy, H. Salem, S. Mourad. – Текст : непосредственный // Journal of performance of constructed facilities. – 2013. – Volume 27. – № 5. – P. 529–539.
  20. Adam, J. M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century / J. M. Adam, F. Parisi, J. Lu X. Sagaseta. – Текст : непосредственный // Engineering Structures. – 2018. – Volume 173. – P. 122–149.
  21. Burdin, D. S. Consideration of physical nonlinearity in the calculation of buildings and structures for resistance to progressive collapse. – Text : direct. – In: *Young scientist*. – 2021. – № 21 (363). – P. 56–62. – URL: <https://moluch.ru/archive/363/81274/> (date of access: 06.04.2024). (in Russian)
  22. Basalaeв, N. A. Design of multi-storey buildings with a metal frame to increase their resistance to progressive collapse. – Text : direct. – In: *Engineering Bulletin of the Don*. – 2018. – № 4(51). – P. 214. (in Russian)
  23. Vedyakov, I. I.; Eremeev, P. G.; Odessky, P. D. [et. al.]. Calculation of building structures for progressive collapse: regulatory requirements. – Text : electronic. – In: *Industrial and civil construction*. – 2019. – № 4. – P. 16–24. – DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. (in Russian)
  24. Androsova, N. B.; Vetrova, O. A. Analysis of research and requirements for the protection of buildings and structures from progressive collapse in the legislative and regulatory documents of Russia and the EU countries. – Text : electronic. – In: *Construction and reconstruction*. – 2019. – № 1(81). – P. 85–96. – DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96. (in Russian)
  25. Danilova, K. A. Calculation of the steel frame of a single-storey building for progressive collapse. – Text : direct. – In: *Bulletin of Science*. – 2019. – Volume 4, № 6(15). – P. 323–326. (in Russian)
  26. Grigorshev, S. M. The study of strength and resistance to the progressive collapse of high-rise buildings of a frame-link structural scheme in the process of construction and operation : specialty 05.23.17 «Construction mechanics» : dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Grigorshev Sergey. – Astrakhan, 2011. – 188 p. – Text : direct. (in Russian)
  27. Starossek, U. Progressive collapse of structures. – London : Thomas Telford, 2009. – 153 p. – Text : direct.
  28. Helmy, H.; Salem, H.; Mourad, S. Computer-aided assessment of progressive collapse of reinforced concrete structures according to GSA code. – Text : direct. – In: *Journal of performance of constructed facilities*. – 2013. – Volume 27, – № 5. – P. 529–539.
  29. Adam, J. M.; Parisi, F.; Sagaseta, J.; Lu, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. – Text : direct. – In: *Engineering Structures*. – 2018. – Volume 173. – P. 122–149.
  30. Gordon, V.; Pilipenko, O. Dynamical processes analysis in the load beams after partial destruction. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Island of Rhodes, Greece, 2017. – Island, 2017. – Volume 2. – P. 3847–3861.
  31. Tsai, M. H.; Zhuang, W. B. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse. – Text : direct. – In: *International Journal of Civil Engineering*. – 2020. – Volume 18. – P. 1025–1037.
  32. Ahmadi, R.; Rashidian, O.; Abbasnia, R. [et. al.]. Experimental and numerical evaluation of progressive

21. Gordon, V. Dynamical processes analysis in the load beams after partial destruction / V. Gordon, O. Pilipenko. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Island of Rhodes, Greece, 2017. – Island, 2017. – Volume 2. – P. 3847–3861.
22. Tsai, M. H. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse / M. H. Tsai, W. B. Zhuang. – Текст : непосредственный // International Journal of Civil Engineering. – 2020. – Volume 18. – P. 1025–1037.
23. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly / R. Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia [et. al.]. – Текст : непосредственный // Shock and Vibration. – 2016. – Volume 2. – P. 211–225.
24. Alanani, M. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method / M. Alanani, M. Ehab, H. Salem. – Текст : непосредственный // Case Studies in Construction Materials. – 2020. – Volume 13. – P. 454–457.
25. Пособие по проектированию мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения : методическое пособие / ФГБОУ ВО «ЮЗГУ», ФГБОУ ВО «МГСУ», ЗАО «ГОРПРОЕКТ» [и др.]. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 158 с. – Текст : непосредственный.
- collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly. – Text : direct. – In: *Shock and Vibration*. – 2016. – Volume 2. – P. 211–225.
24. Alanani, M.; Ehab, M.; Salem, H. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method. – Text : direct. – In: *Case Studies in Construction Materials*. – 2020. – Volume 13. – P. 454–457.
25. Handbook on the design of measures to protect buildings and structures from progressive collapse: a methodological guide / FGBOU VO «South State University», FGBOU VO «MGSU», CJSC «GORPROEKT» [et. al.]. – Moscow : Stan-dartinform, 2018. – 158 p. – Text : direct. (in Russian)

### Информация об авторах

**Миронов Андрей Николаевич** – кандидат технических наук; доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнutosварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

**Горохов Евгений Васильевич** – доктор технических наук, профессор, президент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений. Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

**Оленич Елена Николаевна** – кандидат технических наук; доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: дымовые трубы, сравнение методик расчета дымовых труб, расчет и проектирование зданий и сооружений, оценка состояния существующих конструкций, усиление конструкций.

**Парасюк Кирилл Витальевич** – магистрант Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование устойчивости зданий и сооружений на прогрессирующие обрушения, расчет и проектирование многоэтажных зданий с учетом пульсации ветра.

**Information about the authors**

**Mironov Andrey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Constructions and Structures, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-band I-bars and gnutosvarnyh closed profiles, stress-strain state of steel reinforced concrete structures including pipe-concrete structures.

**Gorokhov Yevgen** – D. Sc. (Engineering), Professor; President of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. The Head of the Metal Structures and Constructions Department. Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, Member of the International Committee of study of wind effects on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

**Olenich Elena** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Constructions and Structures, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: chimneys, comparison of methods of calculation of chimneys, calculation and design of buildings and structures, estimation of a condition of existing designs, strengthening of structures.

**Parasyuk Kirill** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: investigation of the stability of buildings and structures to progressive collapses, calculation and design of multi-storey buildings taking into account wind pulsation.

*Статья поступила в редакцию 04.06.2024; одобрена после рецензирования 17.06.2024; принята к публикации 21.06.2024.*

*The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 17.06.2024; accepted for publication 21.06.2024.*