

Научная статья
УДК 69.04
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>
EDN: FKZDHT



РАСЧЕТ ЭСТАКАДЫ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ ПРЯМЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.Ф. Истомин ✉, М.Ю. Ананьин
Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург, Россия
✉ ответственный автор
istomin.anton89@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрен порядок расчета на прогрессирующее обрушение эстакады под технологические трубопроводы в прямой динамике с использованием различных методов задания времени иницирующего воздействия. Особенность проектирования эстакад под технологические трубопроводы с учетом обеспечения прочности на прогрессирующее обрушение связана с тем, что из-за расположения трубопроводов, как правило, нет возможности поместить связи в плоскости рамы опор эстакады.

Материалы и методы. Расчет выполнен на базе программного комплекса SCAD Office, использующего метод конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния расчетной модели. Произведено исследование на асимптотическую сходимость расчетной модели в трех итерациях с последующим увеличением числа конечных элементов. Оценка сходимости производилась на основе анализа разности усилий в элементах, полученных при расчете каждой итерации. При расчете в прямой динамической постановке используется три метода оценки времени иницирующего воздействия.

Результаты. Произведен анализ асимптотической сходимости расчетной модели, по результатам анализа была выбрана модель с размерностью, при которой усилия в элементах последующих моделей отличаются не более чем на 3%. Выполнено сравнение результатов динамических расчетов с учетом трех вариантов задания времени иницирующего воздействия.

Обсуждение и заключение. По результатам исследования определяется необходимость исследования расчетных моделей на асимптотическую сходимость для оценки и верификации результатов. Делаются выводы по результатам использования трех методов задания времени иницирующего воздействия. Определена зависимость усилий и перемещений от величины времени иницирующего воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, прогрессирующее разрушение, лавинообразное обрушение, живучесть зданий и сооружений

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Истомин А.Ф., Ананьин М.Ю. Расчет эстакады под технологические трубопроводы на прогрессирующее обрушение прямым динамическим методом // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 804-821. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

© Истомин А.Ф., Ананьин М.Ю., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

EDN: FKZDHT

TECHNOLOGICAL PIPELINE STRUCTURAL DESIGN AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE THROUGH DYNAMIC DIRECT ANALYSIS

Anton F. Istomin ✉, **Mikhail Yu. Ananin**
Ural Federal University
Yekaterinburg, Russia
✉ corresponding author
istomin.anton89@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. *this article discusses the procedure of calculation for the progressive collapse of a pipeline overpass in direct dynamics with the use of various methods for setting the initiating impact time. The peculiarity of designing pipeline overpasses in terms of their resistance to progressive collapse is related to the fact that due to the pipelines location it is often not possible to install the bracings within the overpass support frame.*

Materials and methods. *The calculation was performed on the basis of the SCAD Office software package with the finite element method to determine the stress-strain state of the calculation model. A study was conducted on the asymptotic convergence of the calculation model in three iterations, with a subsequent increase in the number of finite elements. The convergence was assessed based on an analysis of the difference in forces in the elements obtained during the calculation of each iteration. When calculating in a direct dynamic formulation, three methods for estimating the initiating impact time were used.*

Results. *The asymptotic convergence of the calculation model was analyzed, and based on the analysis results, a model was selected in which the stresses in the elements of subsequent models differ by no more than 3%. The results of dynamic calculations were compared based on three options for setting the initiating impact time.*

Discussion and conclusion. *Based on the research, the need was proved to study the calculation models for asymptotic convergence to evaluate and verify the results obtained. Conclusions have been made based on the use of three methods for setting the initiating impact time. The dependences between stresses, displacements and the initiating impact time have been determined.*

KEYWORDS: *progressive collapse, progressive destruction, avalanche collapse, survivability of buildings and structures*

The article was submitted: April 29, 2025; **approved after reviewing:** September 17, 2025; **accepted for publication:** October 21, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: *the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.*

For citation. Istomin A.F., Ananin M.Y. Technological pipeline Structural design against PROGRESSIVE COLLAPSE through dynamic direct analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 804-821. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

© Istomin Anton F., Ananin Mikhail Yu., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент, исходя из действующих нормативных документов¹, для зданий класса КС-3² необходимо выполнять расчет на прогрессирующее обрушение. В литературе представлено множество публикаций, в которых рассмотрены примеры подобных расчетов. Анализ подобных публикаций автор проводит в отдельной статье [1], однако актуальных случаев расчета эстакад нет. Также в рамках данной работы были рассмотрены более поздние отечественные публикации [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] и более поздние зарубежные публикации [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36], где также нет примеров расчета эстакад на прогрессирующее обрушение. Поскольку эстакады, предназначенные для технологических трубопроводов, входят в состав зданий и сооружений особо опасных объектов (классы опасности I и II), выполнение такого расчета для них тоже обязательно.

Цель исследования – повысить надежность и безопасность эксплуатации строительных конструкций. Задачи включают: 1) разработку рабочей расчетной модели рамной эстакады без связей в плоскости рамы; 2) определение напряженно-деформированного состояния её элементов при расчете на прогрессирующее обрушение; 3) исследование асимптотической сходимости расчетной модели; 4) проведение динамического расчета с использованием трех методов оценки времени иницирующего воздействия и сравнение полученных результатов.

За основу создания расчетной модели выбран один температурный блок проектируемой трехъярусной эстакады для технологических трубопроводов. Конструкция эстакады включает совокупность температурных блоков,

состоящих из отдельно стоящих подвижных и неподвижных опор, оснащенных траверсами для установки трубопроводов, объединенных продольными балками и фермами для кабельных конструкций. Все опоры закреплены жестко на уровне верха фундаментов. Колонны и ригели первого яруса железобетонные, связи первого яруса и все конструкции вышестоящих ярусов металлические. Класс бетона по прочности В30, применяется арматура класса А500 и металлические конструкции с маркой стали С355. В данной работе не учитываются нелинейные свойства материалов. И, соответственно, рассматривается только упругая деформация, без учета пластики. Так как это проектируемая эстакада, то есть возможность сконструировать эстакаду таким образом, чтобы избежать пластических деформаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты были выполнены в соответствии с актуальными нормативными требованиями^{3,4,5} при использовании программного комплекса SCAD Office и проводились в два этапа:

1) с применением встроенного модуля «прогрессирующее обрушение» для определения расчетных характеристик в квазистатической постановке и формирования вторичной расчетной схемы;

2) последующим использованием этой схемы для проведения расчетов в динамическом режиме.

Оценка времени иницирующего воздействия осуществлена по трем методикам:

1) согласно руководству ФАУ ФЦС⁶, время воздействия $t_{отк}$ составляет 1/10 основного периода собственных колебаний удаляемого элемента, что равно 0,044 сек;

2) по американским нормам 'Progressive Collapse Analysis and Design Guideline'⁷ (GSA,

¹ Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2002, № 52. ст.5140.

² ГОСТ 27751–2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения / ОАО «НИЦ «Строительство». Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.

³ СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Дата введения 2017-06-04 – М.: Стандартинформ, 2016. 104 с.

⁴ СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия Дата введения 2018-02-04 – М.: Стандартинформ, 2017. –30 с.

⁵ СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Общие положения. Дата введения 2019-01-06 - М: Стандартинформ, 2018. 24 с.

⁶ Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: методическое пособие: ФАУ ФЦС. М., 2018.

⁷ GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. October 24, 2013 r.

2013), где указывается, что $t_{отк} \leq 0,1T$, при этом период T равен времени колебаний конструкции без выбывшего элемента и при форме колебаний, напоминающей статическую деформацию системы, $t_{отк}$ равно 0,039 сек;

3) согласно справочнику Коренева и Рабиновича⁸ (стр. 95) 1972 года выпуска, аналогично с расчетом на удар и при условии, что нет возможности оценить время воздействия, можно установить запас прочности и жесткости конструкции, приняв $t_{отк}$, равное 0,001 сек.

Произведен расчет одного температурного блока. После формирования расчетной модели (рисунок 1) и выполнения статического расчета получены следующие типы нагрузок (рисунок 2).

В качестве аварийного воздействия была смоделирована ситуация разрушения наиболее нагруженной колонны. Устойчивость эстакады от прогрессирующего обрушения обеспечена жесткими узлами в плоскости рамы и пролетно-связевыми конструкциями из плоскости рамы. Все узлы проектируются, в том числе с учетом нагрузок от прогрессирующего обрушения. По верхнему ярусу эстакады выполнены вертикальные связи в каждом пролете на протяжении всей эстакады (см. рисунок 1). Для увеличения жесткости узла соединения между железобетонной частью колонны и стальной выполняется заделка сдвигового упора из горячекатаного двутавра 20К5 (рисунок 3).

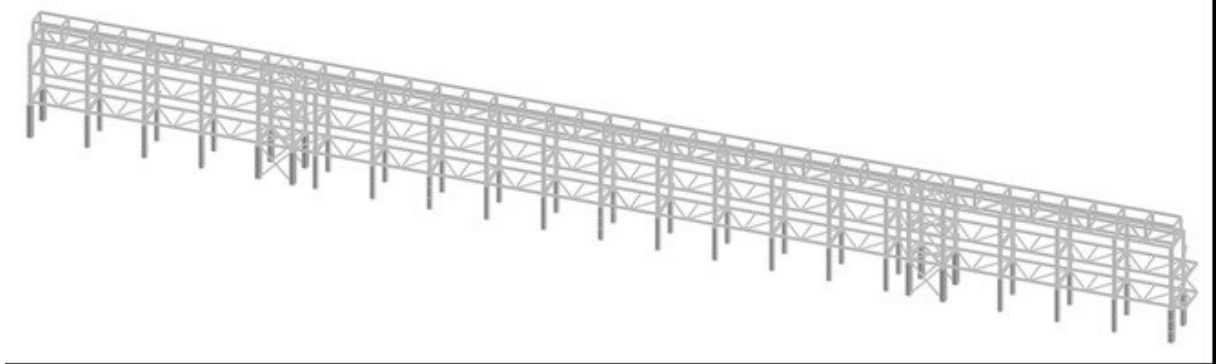


Рисунок 1 – Расчетная схема эстакады
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Calculation scheme of the overpass
Source: compiled by the authors.

	Активное загружение	Активное загружение в РСР	Наименование	Тип загрузки	Вид нагрузки	Знакопере- менные	Участуют в групповых операциях			Коеф. надежнос- ти	Доля длительн- ости	Коеф.			
							Объедине- ния	Взаимоис- ключения	Сопутствия			K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
1	✓	✓	Собственный вес	Постоянные наг	Вес бетонных (п	✓				1,1	1	1	0	0	0
2	✓	✓	Вес оборудования	Длительные наг	Вес стационарнс	✓				1,05	1	1	0	0	0
3	✓	✓	Технология горизон	Длительные наг	Вес стационарнс	✓				1,05	1	1	0	0	0
4	✓	✓	Позезная площадки	Кратковремень	Вес людей и реи	✓				1,1	0	1	0	0	0
5			Ветер Y	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓				1,4	0	1	0	0	0
6			Ветер X	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓				1,4	0	1	0	0	0
7	✓	✓	Пульсация ветер Y	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓	✓			1,4	0	1	0	0	0
8	✓	✓	Пульсация X	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓	✓			1,4	0	1	0	0	0
9	✓	✓	Снег	Кратковремень	Полные снегов	✓				1,4	0	1	0	0	0
10			Ветер Y пульсация	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓				1,4	0	1	0	0	0
11			Ветер X пульсация	Кратковремень	Ветровые нагруз	✓				1,4	0	1	0	0	0
12	✓	✓	Гололедные нагруз	Кратковремень	Гололедные наг	✓				1,8	0	1	0	0	0
13			L1+L2+L3+L4+L10	Постоянные наг	Другие	✓				1	1	1	0	0	0
14			L1+0.5*L2+0.5*L3+	Постоянные наг	Другие	✓				1	1	1	0	0	0

Рисунок 2 – Типы нагрузок
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Load types
Source: compiled by the authors.

⁸ Корнев Б. Г., Рабинович И. М. / справочник по динамике сооружений. Стройиздат, 1972 г.

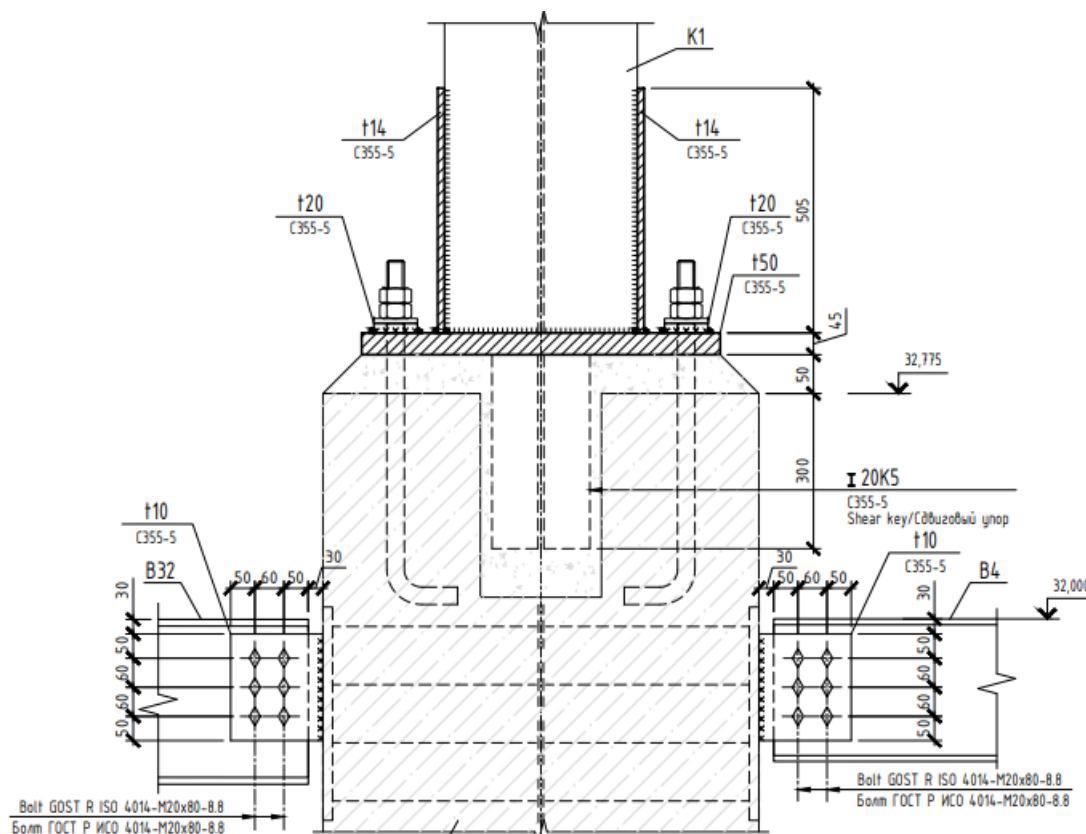


Рисунок 3 – Узел соединения железобетонной части колонны со стальной
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The connection point between the reinforced concrete part of the column and the steel part
Source: compiled by the authors.

По вторичной расчетной модели, использованной для расчета в прямой динамической постановке, произведено исследование асимптотической сходимости. Для этого сделан расчет трех вариантов схемы с последовательным увеличением числа конечных элементов:

- 1) количество конечных элементов = 1989 шт.;
- 2) количество конечных элементов = 5595 шт.;

- 3) количество конечных элементов = 11004 шт.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам расчета в прямой динамике трех вариантов схемы определены напряженно-деформируемые состояния трех схем, максимальные и минимальные усилия в элементах отображены на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9. Суммарные перемещения отображены на рисунках 10, 11, 12.

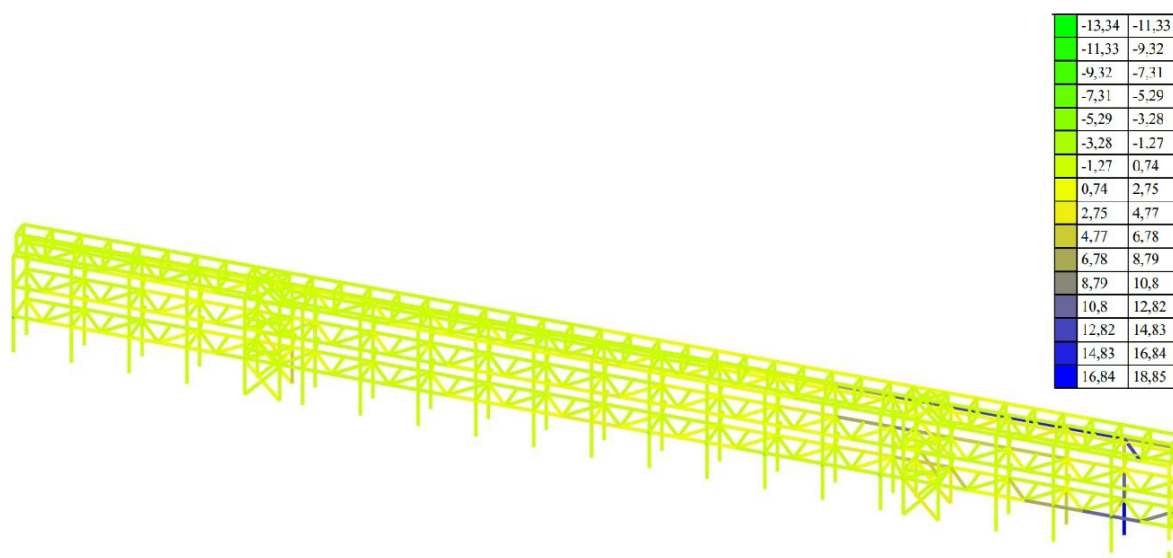


Рисунок 4 – Эпюра усилий комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Combined force diagram for the maximum force N_{max} , t. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

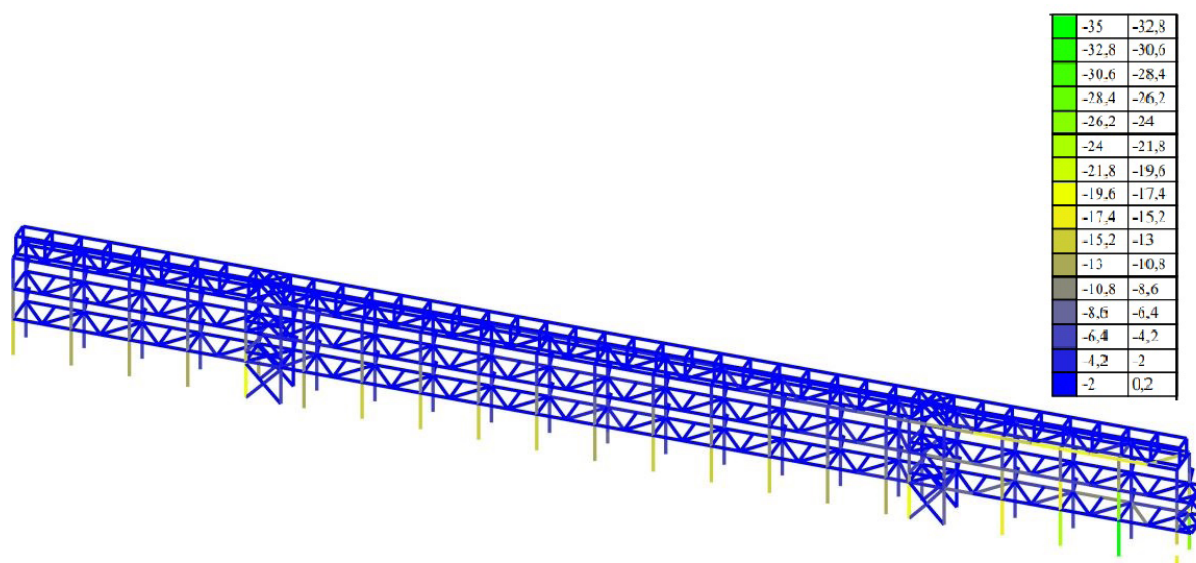


Рисунок 5 – Эпюра усилий комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 5 - Combined force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

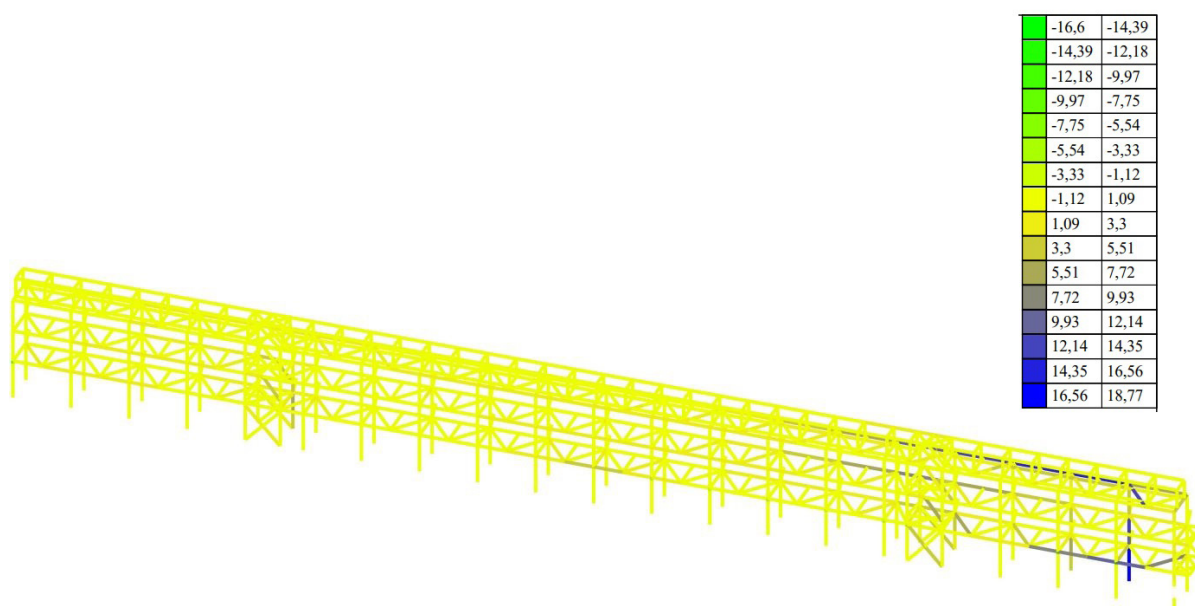


Рисунок 6 – Эпюра усилий комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 5595 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Combined force diagram for the maximum force N_{max} , t. Number of KE 5595 pcs.
Source: compiled by the authors.

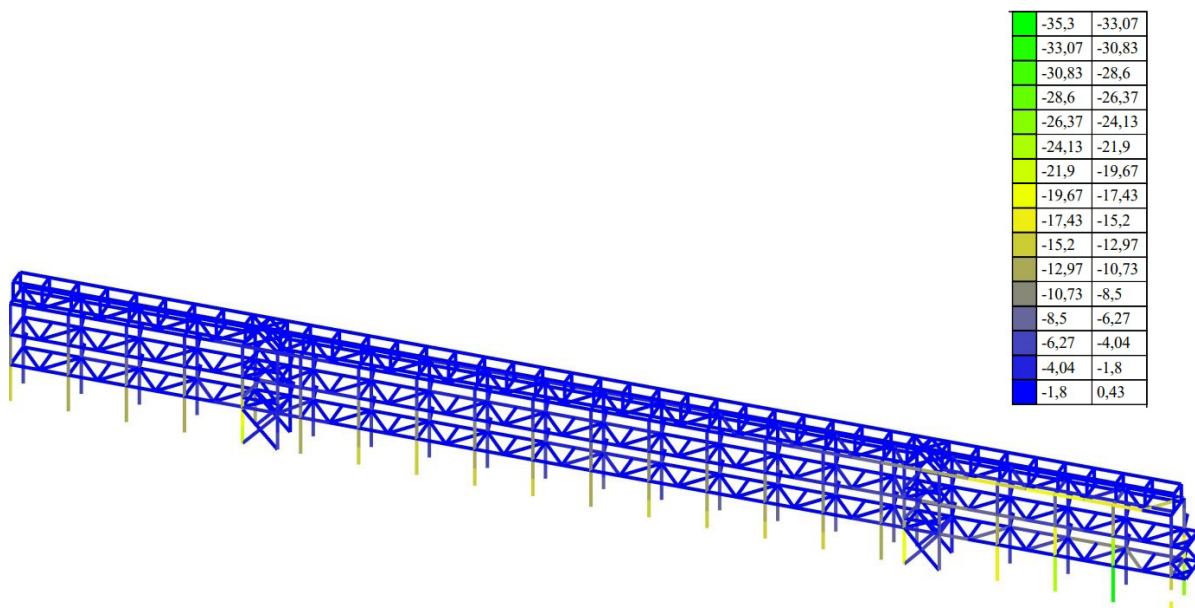


Рисунок 7 – Эпюра усилий комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 5595 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Combined force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 5595 pcs.
Source: compiled by the authors.

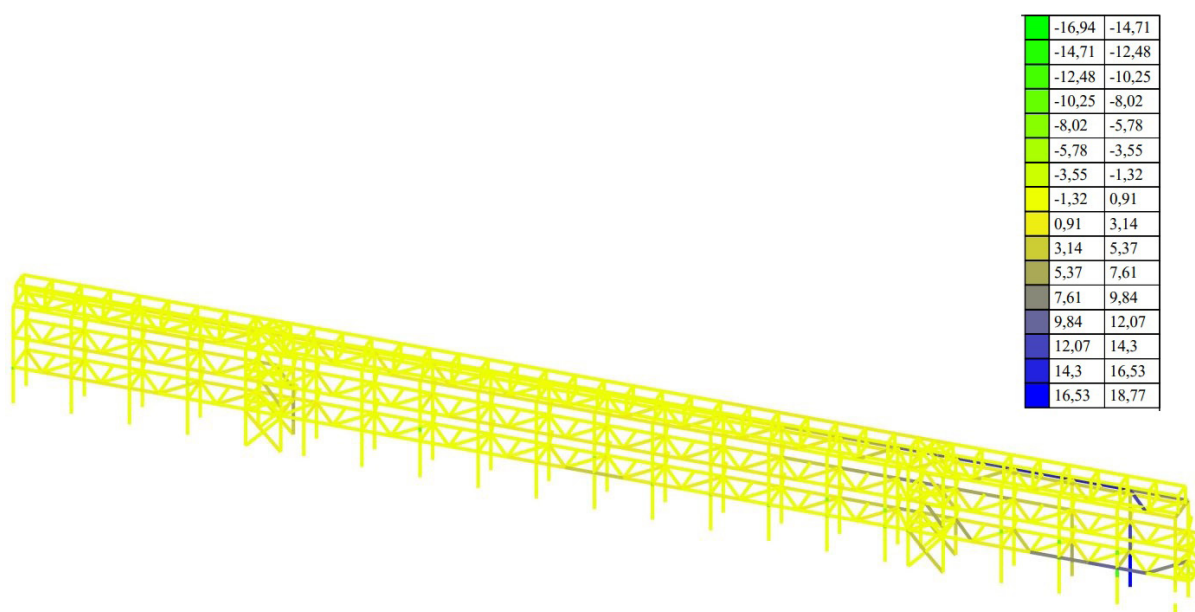


Рисунок 8 – Эпюра усилий N комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 11004 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Combined force diagram for maximum force N_{max} , t. Number of KE 11004 pcs.
Source: compiled by the authors.

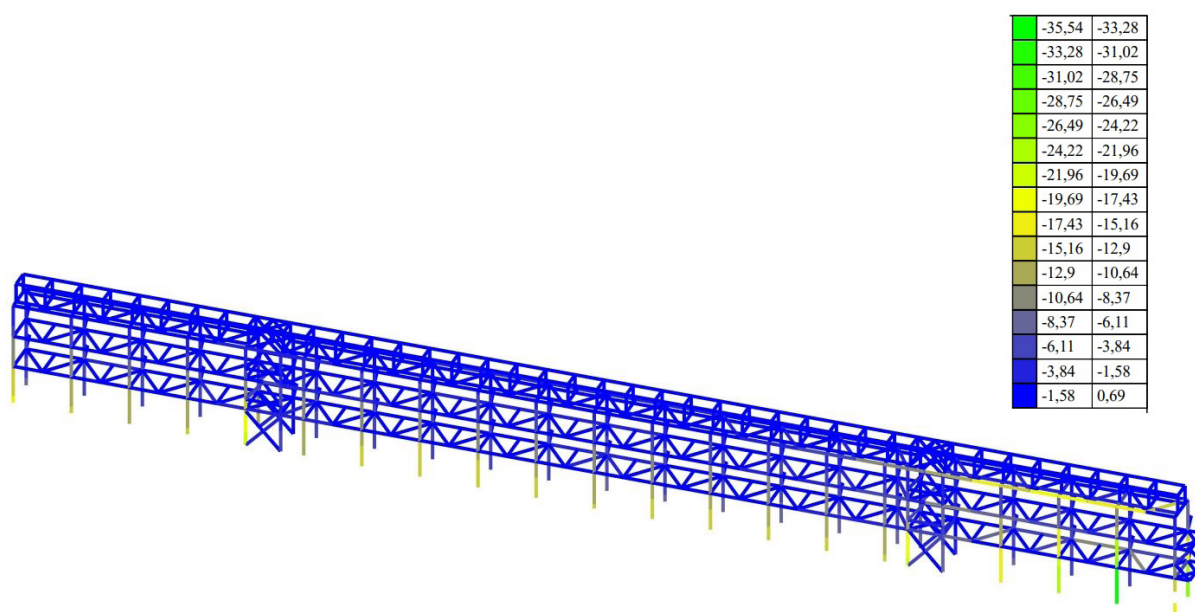


Рисунок 9 – Эпюра усилий N комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 11004 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Combined N force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 11004 pcs.
Source: compiled by the authors.

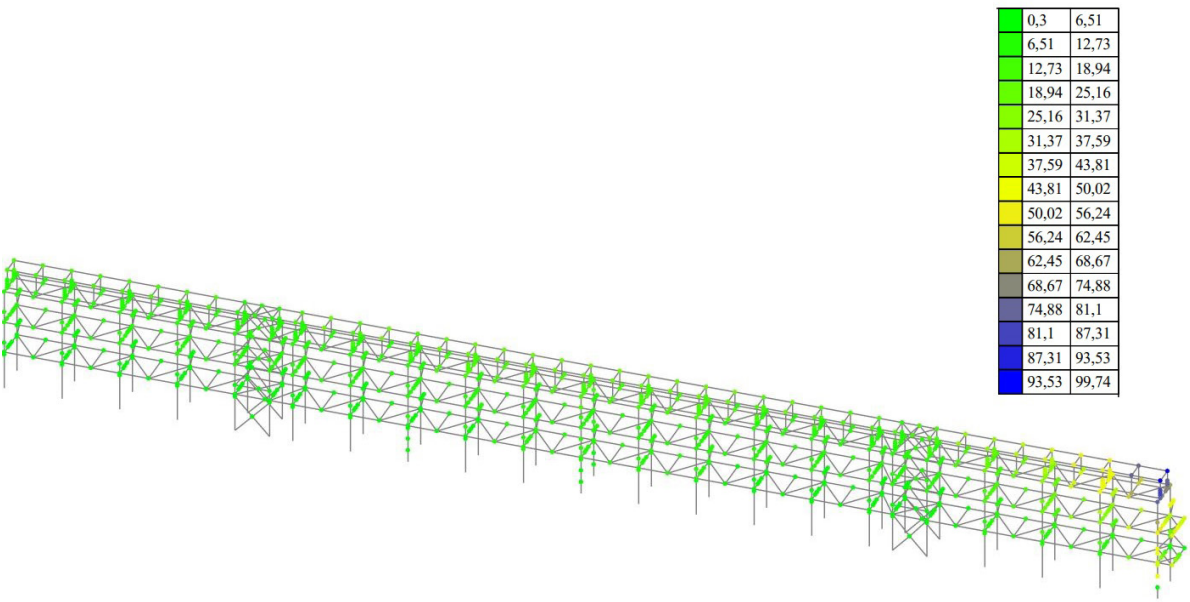


Рисунок 10 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

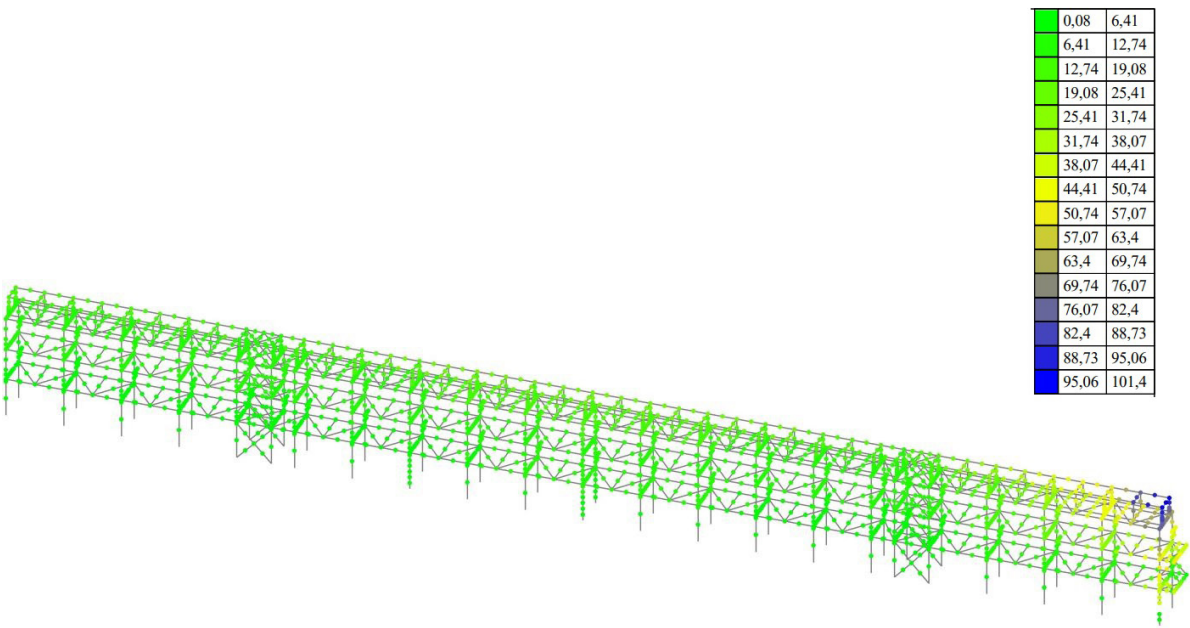


Рисунок 11 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

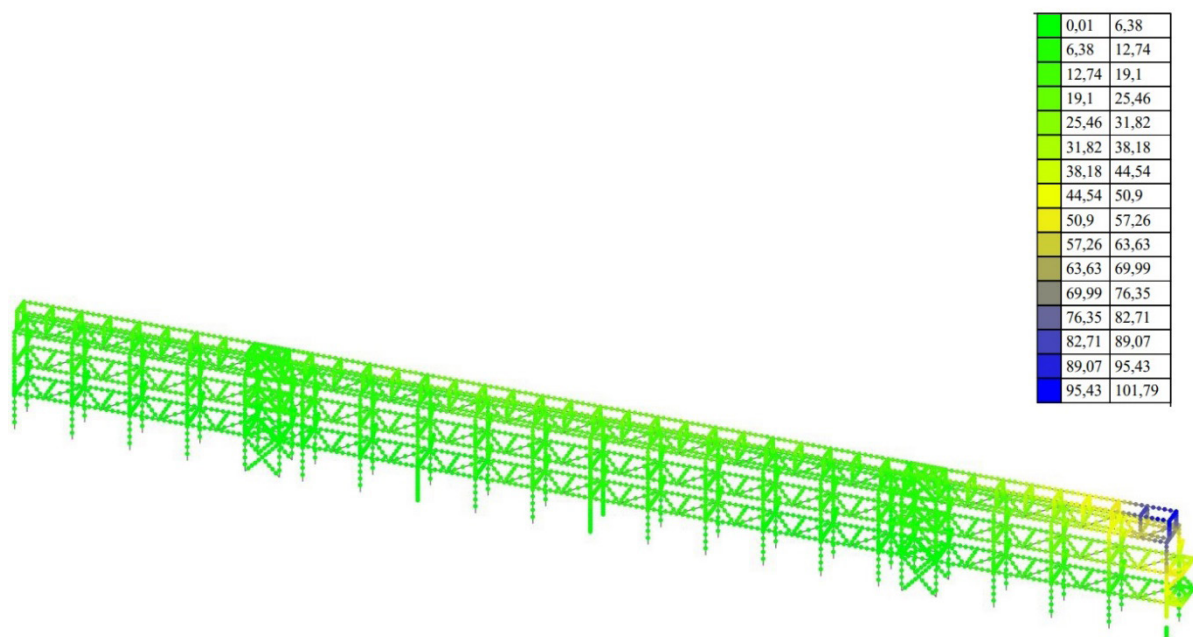


Рисунок 12 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

Данные для анализа асимптотической сходимости отображены в таблице 1, асимптоты зависимости значений усилий и значений перемещений от количества конечных элементов отображены на рисунках 13, 14, 15.

Таблица 1
Результаты расчета
Источник: составлено авторами.

Table 1
Calculation results
Source: compiled by the authors.

Количество КЭ, шт.	Nmax, т	$\frac{N_{max}^n - N_{max}^{n-1}}{N_{max}^n} * 100\%$	Nmin, т	$\frac{N_{min}^n - N_{min}^{n-1}}{N_{min}^n} * 100\%$	Перемещения, мм	$\frac{\Delta_{max}^n - \Delta_{max}^{n-1}}{\Delta_{max}^n} * 100\%$
1989	18,85		-35		99,74	
5595	18,77	-0,43	-35,3	0,85	101,4	1,64
11004	18,77	0,00	-35,54	0,68	101,79	0,38

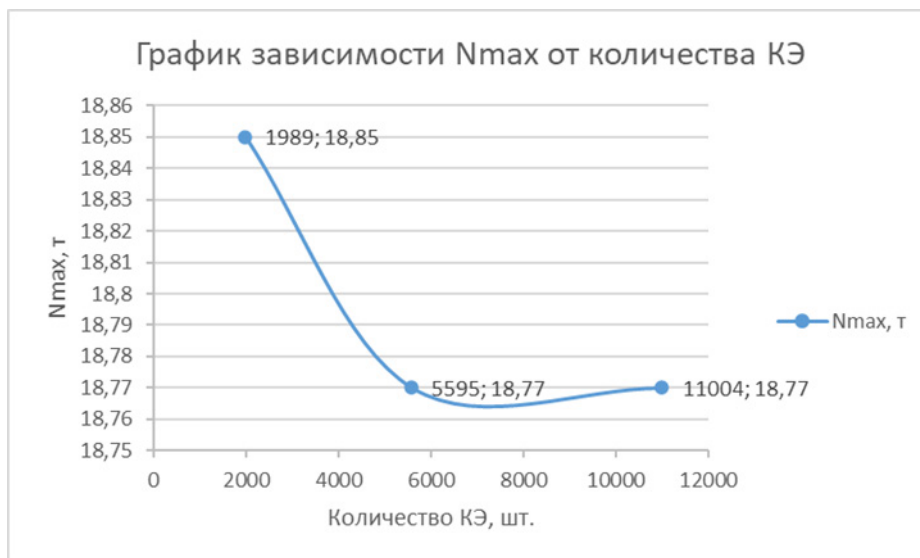


Рисунок 13 – График зависимости N_{max}, t , от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Dependence between N_{max}, t and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

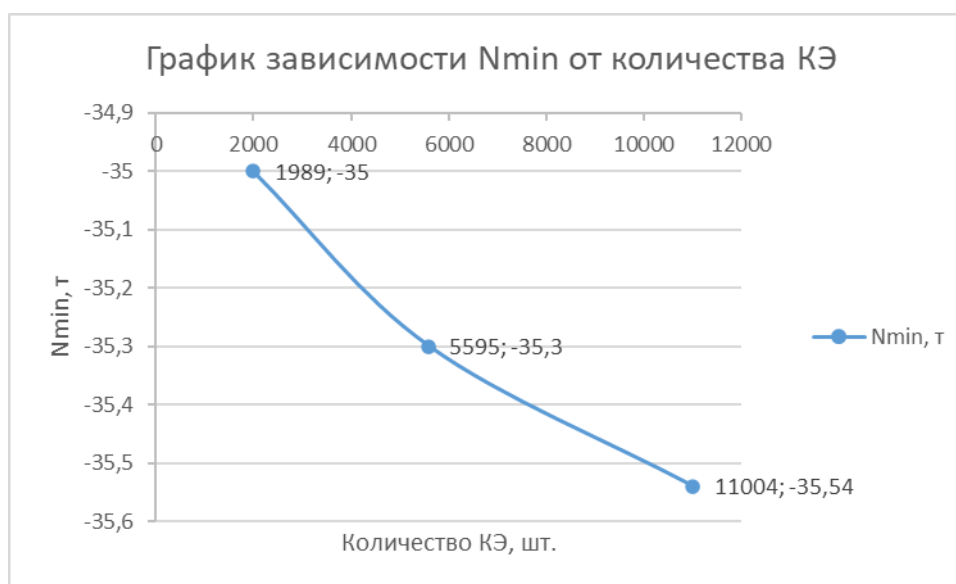


Рисунок 14 – График зависимости N_{min}, t , от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 14 – Dependence between N_{min}, t and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

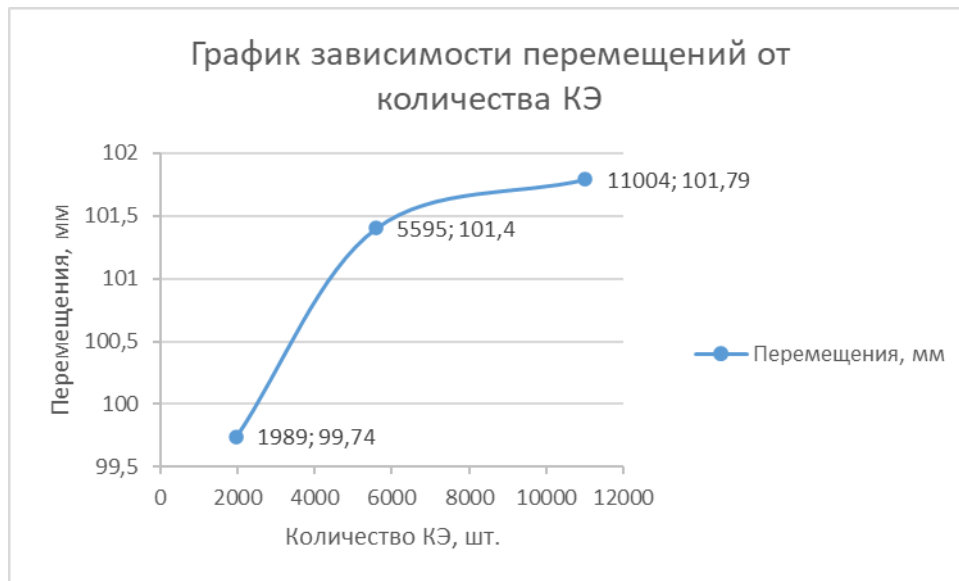


Рисунок 15 – График зависимости значений максимальных суммарных перемещений, мм, от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Dependence between values of the maximum total displacements, mm and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

При выполнении расчета последующие значения величин напряженно-деформированного состояния отличаются от предыдущих не более чем на 3%, соответственно размерность конечно-элементной сетки удовлетворяет поставленным задачам. Принимаем последнюю схему с количеством элементов, равным 11004 шт. для дальнейшего анализа.

На рисунке 16 отображен график перемещений узла над удаляемым элементом по оси Z во времени.

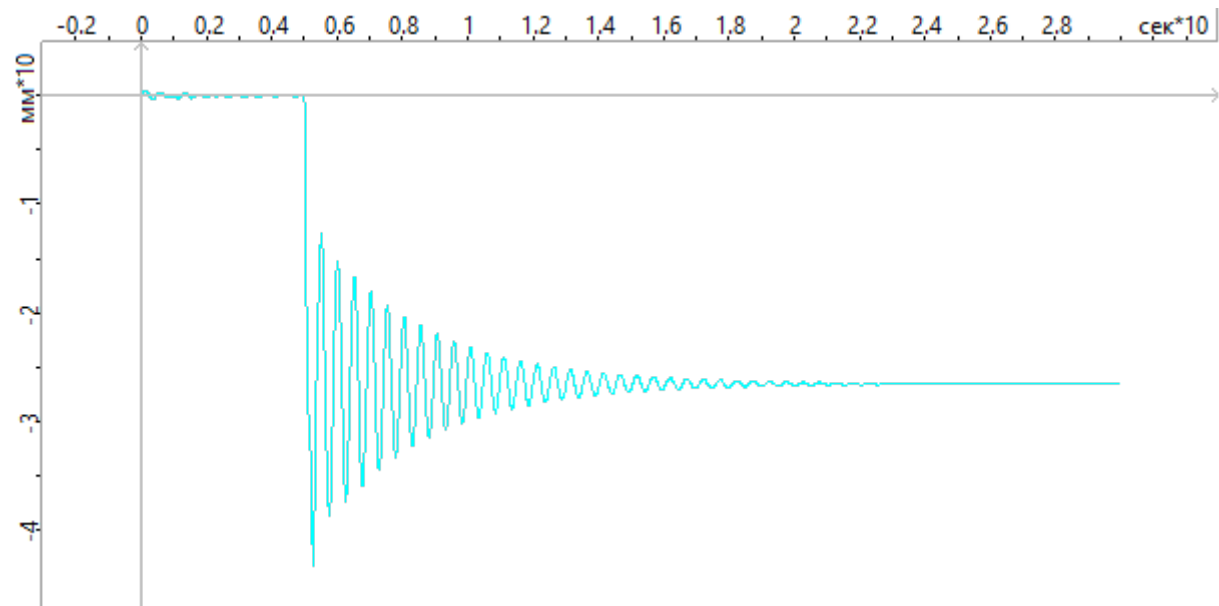


Рисунок 16 – График значений перемещений узла по оси Z в мм/сек
Источник: составлено авторами.

Figure 16 – Node displacement values along the Z axis in mm/sec
Source: compiled by the authors.

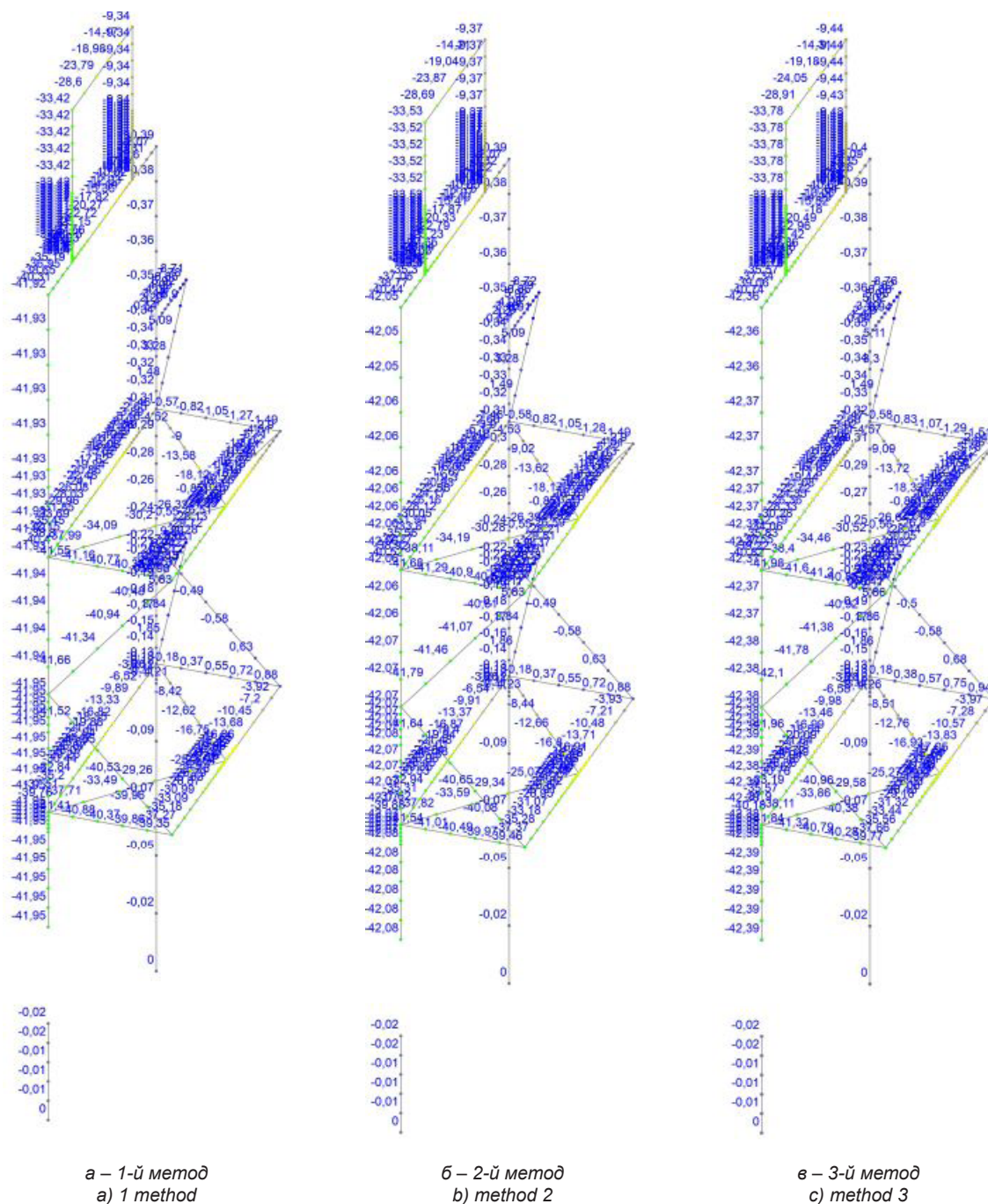


Рисунок 17 – Эпюра перемещений узла по оси Z в мм
Источник: составлено авторами.

Figure 17 – Node displacement along the Z axis in mm
Source: compiled by the authors.

При задании начальных условий для моделирования инициирующего воздействия было установлено время задержки в 5 сек для начала приложения нагрузок. Это хорошо видно на графике: в первые пять секунд система находится в состоянии равновесия; по истечении

этого времени начинается моделирование разрушения колонны с помощью динамических нагрузок, после чего прослеживается реакция системы и затухание колебаний в диапазоне 5–20 сек, а также стабилизация в новом положении на более поздних этапах (после 20 сек).

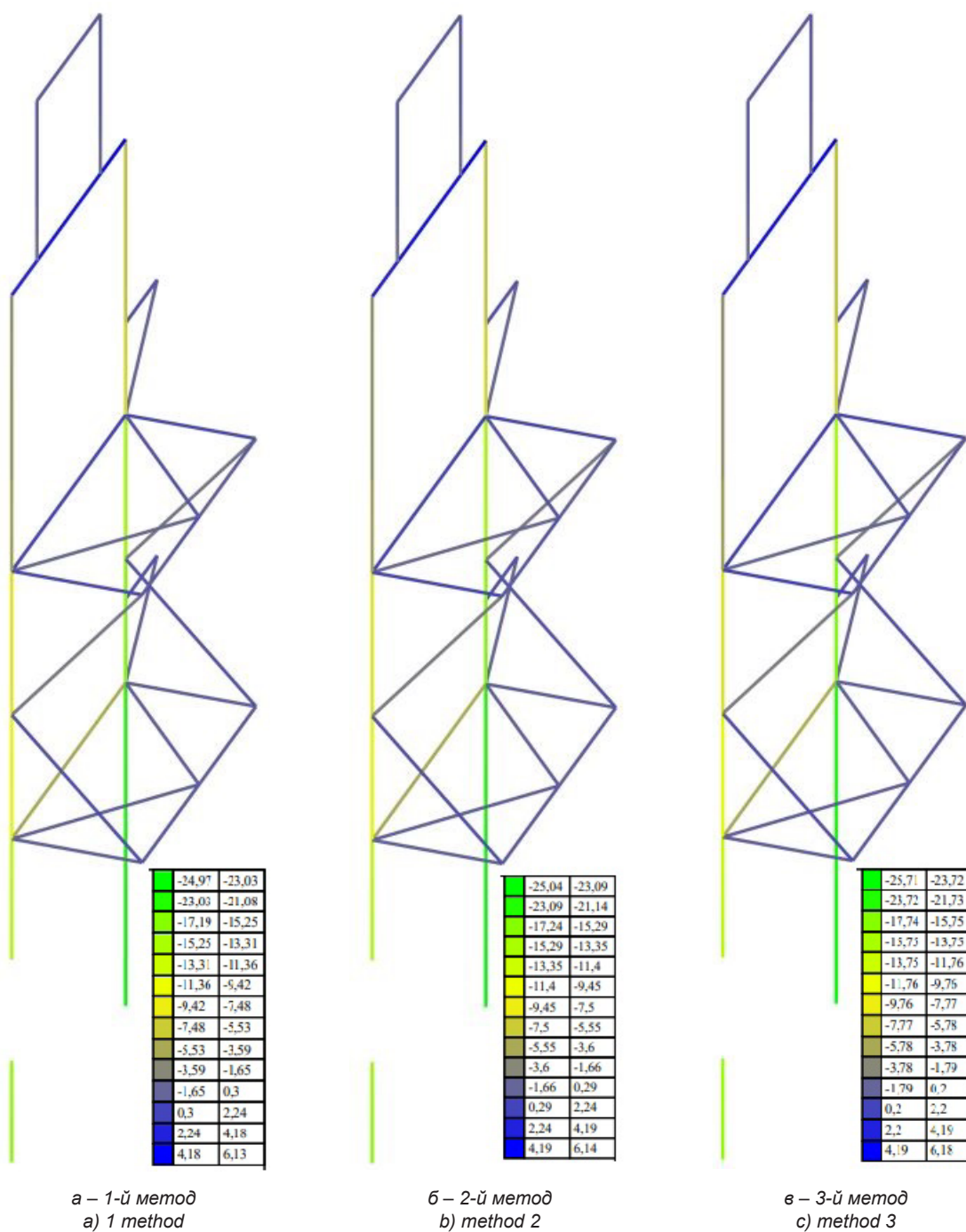


Рисунок 18 – Эпюра усилий в раме с удаляемым элементом N , t
Источник: составлено авторами.

Figure 18 – Forces in the frame with a removable element N , t
Source: compiled by the authors.

По результатам расчета тремя методами задания времени инициирующего воздействия определим перемещения в точке, располо-

женной над удаляемым элементом колонны, данные отображены на рисунке 17 и усилия в раме (рисунок 18).

Сравнение результатов расчетов тремя методами задания времени инициирующего воздействия отображено в таблице 2.

Таблица 2
Результаты расчета
Источник: составлено авторами.

Table 2
Calculation results
Source: compiled by the authors.

№ Метода	N, т	$\frac{N_{\max}^n - N_{\max}^{n-1}}{N_{\max}^n} \cdot 100\%$	Перемещения, мм	$\frac{\Delta_{\max}^n - \Delta_{\max}^{n-1}}{\Delta_{\max}^n} \cdot 100\%$
Метод 1	-24,97		-41,95	
Метод 2	-25,04	0,28	-42,08	0,31
Метод 3	-25,77	2,83	-42,39	0,73

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При выполнении расчета прямым динамическим методом необходимо проводить анализ асимптотической сходимости конечно-элементной модели, так как результаты расчетов с различной размерностью конечно-элементной сетки могут отличаться. В нашем случае результаты отличаются менее чем на 3%.

2. Из графика перемещений узла над удаляемой колонной (см. рисунок 14) наглядно видно время, необходимое для стабилизации системы в новом положении. Рекомендации по времени стабилизации дать сложно, для этого необходимо учесть риски воздействия других внешних факторов в период стабилизации системы. Очевидно, что чем быстрее стабилизируется система, тем меньше рисков, что в этот период появится другое воздействие, дестабилизирующее систему. Также стоит отметить, что на графике (см. рисунок 14) видно постепенное линейное затухание колебаний, то есть нет периодов, когда колебания увеличиваются, потом затухают и снова увеличиваются. Такое нелинейное изменение колебаний и их влияние на смежные конструкции требует отдельного изучения.

3. Сравнение значений усилий элементов и перемещений узлов по результатам расчетов на прогрессирующее обрушение тремя методами задания времени инициирующего

воздействия дает примерно одинаковые результаты.

Меньше нагружена система при использовании первого метода согласно рекомендациям ФАУ ФЦС⁹, более нагружена при использовании второго метода согласно нормам Progressive collapse analysis and design guideline (GSA.2013)¹⁰, и больше всего нагружена при использовании рекомендаций справочником Коренева и Рабиновича¹¹ от 1972 г. (стр. 95).

Также по результатам расчетов мы видим, что чем меньше длительность инициирующего воздействия (более резкое возникновение аварийной нагрузки), тем большие по модулю усилия и перемещения возникают в элементах и узлах.

4. Для определения того, какой из трех методов наиболее приближен реальному поведению строительных конструкций при аварийном воздействии рекомендуется проведение натурных испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Истомин А.Ф. Анализ статей и научных публикаций на тему прогрессирующего обрушения // Вестник ПНИПУ. 2020. № 2. С. 22–29.
2. Остянко В.В. Исследование работы арочных и перекрестных арочных систем на устойчивость против прогрессирующего обрушения квазистатическим методом в линейной постановке // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 4-2. С. 141–145. – 5 с.

⁹ Методическое пособие. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения ФАУ ФЦС, Москва, 2018 г.

¹⁰ GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. October 24, 2013 г.

¹¹ Справочник по динамике сооружений Коренев Б. Г., Рабинович И. М. Стройиздат, 1972 г.

3. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Кадомцев М.И., Труфанова Е.В., Савельева Н.А. Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Том 49, № 1. С. 87–94. – 8 с.
4. Подшивалов И.И. Моделирование напряженного состояния безригельных перекрытий экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 25. С. 134–141. – 8 с.
5. Митрович Б. Оценка устойчивости монолитных железобетонных несущих систем к прогрессирующему обрушению на основе принципа уровня допускаемых повреждений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 3. С. 61–72. – 10 с.
6. Терешин Ю.А., Павлов Д.А. Защита от прогрессирующего обрушения литейных дворов доменных печей // Символ науки. 2022. № 4-2. С. 25–27. – 3 с.
7. Рекунов С.С., Косова А.Ю., Иванов С.Ю., Завьялов И.С. Расчёт многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3 (36). С. 15–20. – 6 с. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-15-20
8. Митрович Б. Верификация методики использования коэффициента редукции при расчете монолитных железобетонных систем на устойчивость к прогрессирующему обрушению // Строительство и реконструкция. 2021; (3):68–75.
9. Ведяков И.И., Соловьев Д.В. Разработка методики оценки риска прогрессирующего обрушения // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. 28(1): 5–15.
10. Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2022; Т.19, № 2(84). С. 290–299.
11. Колчунов В.И., Московцева В.С., Бушова О.Б., Жуков Д.И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения // Строительство и реконструкция. 2021. (4): 35–44.
12. Завьялова О.Б., Куликов В.В. Особенности создания расчетных схем, расчета и конструирования многоэтажного каркасного здания с соблюдением мер защиты от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 1 (39). С. 58–65.
13. Истомин А.Ф., Кучин М.В. Оценка факторов прогрессирующего обрушения строительных конструкций // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55) С. 152–158. – 7 с.
14. Лисневский А.Е. Проблемы прогрессирующего обрушения // Томский государственный архитектурно-строительный университет. 2022. С. 31–38. – 8 с.
15. Караханян В.Б., Овчинников И.И., Баев М.А., Овчинников И.Г. Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям // Транспортные сооружения. 2020. № 2. С. 1–20. – 20 с.
16. Подшивалов И.И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 3. С. 180–190. – 11 с.
17. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020, vol. 206.
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, B.H. Abu Bakar, Emad A.H. Alwesabi, Hazizan Md Akil Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview // Structures. 2020, vol. 25 P. 881-900 – 20 p.
19. Foad Kiakojouri, Mohammad Reza Sheidaii, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature // Structures. 2021, vol. 29 P. 1417-1423 – 7 p.
20. Iftikhar Azim, Jian Yang, Sanjeev Bhatta, Feiliang Wang, Qing-feng Liu Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // Journal of Building Engineering. 2020, vol. 27.
21. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda // Engineering Structures. 2020, vol. 262.
22. Hamzeh Shakib, Maedeh Zakersalehi, Vahid Jahangiri, Reza Zamanian Evaluation of Plasco Building fire-induced progressive collapse // Structures. 2020, vol. 28 P. 205-224 – 10 p.
23. Xiao-Huang-Can He, Tak-Ming Chan, Kwok-Fai Chung Effect of inter-module connections on progressive collapse behaviour of MiC structures // Journal of Constructional Steel Research. 2021, vol. 185.
24. Bao Meng, Liangde Li, Weihui Zhong, Zheng Tan, Qiangqiang Du Improving anti-progressive collapse capacity of welded connection based on energy dissipation cover-plates // Journal of Constructional Steel Research. 2022, vol. 188.
25. De-Cheng Feng, Hai-Rong Shi, Fulvio Parisi, Emanuele Brunesi, Chun-Lin Wang Efficient numerical model for progressive collapse analysis of prestressed concrete frame structures // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 129.
26. Ibrahim M.H. Alshaikh a b, B.H. Abu Bakar a, Emad A.H. Alwesabi a b, Abdullah M. Zeyad c, Hassan M. Magbool Finite element analysis and experimental validation of progressive collapse of reinforced rubberized concrete frame // Structures. 2020, vol. 33. P. 2361-2373 – 13 p.
27. De-Cheng Feng, Si-Cong Xie, Jun Xu, Kai Qian Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the

probability density evolution method // *Engineering Structures*. 2020, vol. 202.

28. Yun-Hao Weng, Kai Qian, Feng Fu, Qin Fang Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse // *Journal of Building Engineering*. 2020, vol. 29

29. Huiyun Qiao, Xinyu Xie, Yu Chen Improvement of progressive collapse resistance for a steel frame system with beam–web opening // *Engineering Structures*. 2022, vol. 256.

30. Yuan Tian, Kaiqi Lin, Xinzhen Lu, Lei Zhang, Yi Li, Hong Guan Experimental and theoretical study of seismic and progressive collapse resilient composite frames // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020, vol. 139.

31. Martina Scalvenzi, Sebastiano Gargiulo, Fabio Freddi, Fulvio Parisi Impact of seismic retrofitting on progressive collapse resistance of RC frame structures // *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 131.

REFERENCES

1. Istomin A.F. Analysis of articles and scientific publications on the topic of progressive collapse. *Vestnik PNRPU*. 2020; 2: 22-29 - 7 p. (in Russ.).

2. Ostyanko V.V. Study of the operation of arch and cross arch systems for stability against progressive collapse by a quasi-static method in a linear formulation *Actual scientific research in the modern world*. 2021; 4-2: 141-145 - 5 p. (in Russ.).

3. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Kadomtsev M.I., Trufanova E.V., Savelyeva N.A. Digital modeling of progressive collapse of a high-rise building. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2022; 49 (1): 87-94 - 8 p. (in Russ.).

4. Podshivalov I.I. Modeling the stress state of crossbarless ceilings of an experimental building from progressive collapse. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 25: 134-141 - 8 p. (in Russ.).

5. Mitrovic B. Evaluation of the stability of monolithic reinforced concrete bearing systems to progressive collapse based on the principle of the level of permissible damage. *Seismic-resistant construction. Safety of structures* 2021; 3: 61-72 - 10 p. (in Russ.).

6. Yu.A. Tereshin, Pavlov D.A. Protection against progressive collapse of foundry yards of blast furnaces. *International scientific journal "Symbol of Science"* 2022; 4-2: 25-27 - 3 p. (in Russ.).

7. Rekunov S.S., Kosova A.Yu., Ivanov S.Yu., Zavyalov I.S. Calculation of a multi-story building for progressive collapse under seismic impact. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Priaspia*. 2021; No. 3 (36): P. 15–20. – 6 p. (in Russ.). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-15-20

8. Mitrovic B. Verification of the method of using the reduction coefficient in the calculation of monolithic reinforced concrete systems for resistance to progressive cavity. *Construction and reconstruction*. 2021; (3): 68-75. (in Russ.).

9. Vedyakov I.I., Soloviev D.V. Development of a methodology for assessing the risk of progressive col-

lapse. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2021; 28(1): 5-15. (in Russ.).

10. Krasnoshchekov Yu.V. Protection against progressive collapse of buildings with prefabricated reinforced concrete ceilings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (2): 290-299. (in Russ.).

11. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushova O.B., Zhukov D.I. Computational analysis of protection methods for monolithic frames of multistory buildings with flat slabs from progressive collapse. *Construction and reconstruction*. 2021; (4): 35-44. (in Russ.).

12. Zavyalova O.B., Kulikov V.V. Features of creating design schemes, calculation and design of a multi-storey frame building in compliance with protection measures against progressive collapse. *Astrakhan: GAOU JSC VO "AGASU"*, 2022; 1 (39): pp. 58–65. (in Russ.).

13. Istomin A.F., Kuchin M.V. Evaluation of the factors of progressive collapse of building structures. *Systems Methods Technologies*. 2022; 3 (55): 152-158 - 7 p. (in Russ.).

14. Lisnevsky A.E. Problems of progressive collapse. *Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022. 31-38 - 8 p. (in Russ.).

15. Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. Features of progressive destruction in relation to bridge structures. *Transport facilities*. 2020; 2: 1-20 - 20 p. (in Russ.).

16. Podshivalov I.I. Analysis of the results of modeling the stress state of columns and connections of an experimental building from progressive collapse. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; 24 (3): 180–190 – 11 p. (in Russ.).

17. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*. 2020; 206.

18. Ibrahim M.H. Alshaikh, B.H. Abu Bakar, Emad A.H. Alwesabi, Hazizan Md Akil Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures*. 2020; 25: 881-900 – 20 p.

19. Foad Kiakojouri, Mohammad Reza Sheidaii, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature. *Structures*. 2021; 29: 1417-1423 – 7 p.

20. Iftikhar Azi, Jian Yang, Sanjeev Bhatta, Feiliang Wang, Qing-feng Liu Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27.

21. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda. *Engineering Structures*. 2020; 262.

22. Hamzeh Shakib, Maedeh Zakersalehi, Vahid Jahangiri, Reza Zamanian Evaluation of Plasco Building fire-induced progressive collapse. *Structures*. 2020; 28: 205-224 – 10 p.

23. Xiao-Huang-Can He, Tak-Ming Chan, Kwok-Fai Chung Effect of inter-module connections on progressive collapse behaviour of MiC structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 185.

24. Bao Meng, Liangde Li, Weihui Zhong, Zheng Tan, Qiangqiang Du Improving anti-progressive collapse capacity of welded connection based on energy dissipation cover-plates. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 188.

25. De-Cheng Feng, Hai-Rong Shi, Fulvio Parisi, Emanuele Brunesi, Chun-Lin Wang. Efficient numerical model for progressive collapse analysis of prestressed concrete frame structures. *Engineering Failure Analysis*. 2021; 129.

26. Ibrahim M.H. Alshaikh a b, B.H. Abu Bakar a, Emad A.H. Alwesabi a b, Abdullah M. Zeyad c, Hassan M. Magbool Finite element analysis and experimental validation of progressive collapse of reinforced rubberized concrete frame. *Structures*. 2020; 33: 2361-2373 – 13 p.

27. De-Cheng Feng, Si-Cong Xie, Jun Xu, Kai Qian. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method.. *Engineering Structures*. 2020; 202.

28. Yun-Hao Weng, Kai Qian, Feng Fu, Qin Fang. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse. *Journal of Building Engineering*. 2020; 29.

29. Huiyun Qiao, Xinyu Xie, Yu Chen Improvement of progressive collapse resistance for a steel frame system with beam–web opening. *Engineering Structures*. 2022; 256.

30. Yuan Tian, Kaiqi Lin, Xinzheng Lu, Lei Zhang, Yi Li, Hong Guan. Experimental and theoretical study of seismic and progressive collapse resilient composite frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 139.

31. Martina Scalvenzi, Sebastiano Gargiulo, Fabio Freddi, Fulvio Parisi. Impact of seismic retrofitting on progressive collapse resistance of RC frame structures. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 131.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Истомин А. Ф. Исследование описанной в работе темы, разработка расчетной модели и проведение расчетов, анализ результатов, подготовка текста статьи.

Ананьин М. Ю. Общее руководство научной деятельностью, организация работы, рецензирование, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Istomin Anton F. Research of the topic described in the work, development of the calculation model and calculations, analysis of the results, writing the manuscript.

Ananyin Mikhail Y. Concept design, general management of the research, organization of research activities, reviewing, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Истомин Антон Федорович – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6957-2109>,

SPIN-код: 8412-5086,

Researcher ID: HGC-9578-2022,

e-mail: istomin.anton89@gmail.com

Ананьин Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц. Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5077-0834>,

SPIN-код: 2323-3614,

Scopus: 57202286491,

Researcher ID: GWZ-3221-2022,

e-mail: m.y.ananin@urfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Istomin Anton F. – postgraduate student of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620062, Yekaterinburg, Mira str., 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6957-2109>,

SPIN-code: 8412-5086,

Researcher ID: HGC-9578-2022,

e-mail: istomin.anton89@gmail.com

Ananin Mikhail Y. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620062, Yekaterinburg, Mira str., 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5077-0834>,

SPIN-code: 2323-3614,

Scopus: 57202286491,

Researcher ID: GWZ-3221-2022,

e-mail: m.y.ananin@urfu.ru