



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.3.34-43

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Восстановление несущих конструкций зданий после аварий

О.А. Симаков^{1*}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация*

* simakova@mgsu.ru

Ключевые слова: восстановление, усиление, особые предельные состояния, авария

История статьи

Поступила в редакцию: 30.07.2024

Доработана: 05.09.2024

Принята к публикации: 07.09.2024

Для цитирования

Симаков О.А. Восстановление несущих конструкций зданий после аварий // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 7. № 3. С. 34–43.

Аннотация. Вопросам защиты зданий от особых, как правило не проектных, воздействий, в том числе от прогрессирующего обрушения, в результате аварийных воздействий посвящено множество научной работы, и разработаны нормативные документы, регламентирующие расчетные и конструктивные положения для применения на этапе проектирования. В то же время остаются открытыми вопросы усиления существующих зданий и сооружений на этапах капитального ремонта, реконструкции (если на этапе проектирования не были предусмотрены мероприятия, например, по защите от прогрессирующего обрушения, то приведение конструкций к требованиям норм является сложной, зачастую невыполнимой задачей), а также восстановление несущих конструкций после аварийных ситуаций. В соответствии с действующими нормативными документами расчет на особое предельное состояние проводится с пониженными коэффициентами для нагрузок и учетом динамического упрочнения для расчетного сопротивления материалов. После аварийного воздействия необходимо выполнить расчет по предельным состояниям с учетом всех коэффициентов надежности, что приводит, как правило, к дефициту несущей способности значительного числа несущих конструкций с учетом повреждения отдельных конструкций и перераспределения усилий на другие, неповрежденные. Именно для данного эксплуатационного этапа после особого воздействия, рассмотренного в настоящей статье, отсутствуют особые требования и допущения в работе несущих конструкций здания.

Restoration of Load-Bearing Structures of Buildings after Accidents

Oleg A. Simakov^{1*}

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

* simakova@mgsu.ru

Олег Александрович Симаков, канд. техн. наук, доцент каф. Железобетонные и каменные конструкции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 2040-7137, Scopus: 57193263878, ResearcherID: AAG-1930-2022, ORCID: 0000-0001-6665-4291, E-mail: simakova@mgsu.ru

© Симаков О.А., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: restoration, strengthening, special limit states, accident

Article history

Received: 30.07.2024

Revised: 05.09.2024

Accepted: 07.09.2024

For citation

Simakov O.A. Restoration of Load-Bearing Structures of Buildings after Accidents. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 3(7):34-43.

Abstract. The issues of protecting buildings from special, usually non-design, impacts, including progressive collapse as a result of emergency impacts, are the subject of many scientific works and regulatory documents have been developed regulating calculation and design provisions for application at the design stage. At the same time, the issues of strengthening existing buildings and structures at the stages of major repairs, reconstruction (if measures, for example, for protection against progressive collapse were not envisaged at the design stage, then bringing the structures to the requirements of the standards is a complex, often impossible task), as well as restoration of load-bearing structures after emergency situations remain open. In accordance with the current regulatory documents, the calculation for a special limit state is carried out with reduced coefficients for loads and taking into account the dynamic hardening for the design resistance of materials. After an emergency impact, it is necessary to perform a calculation for limit states taking into account all reliability factors, which usually leads to a deficit in the bearing capacity of a significant number of load-bearing structures taking into account the damage to individual structures and the redistribution of forces to others that are not damaged. It is for this operational stage after the special impacts considered in this article that there are no special requirements and assumptions in the operation of the building's load-bearing structures.

ВВЕДЕНИЕ

Срок эксплуатации зданий и сооружений исчисляется десятилетиями. Нельзя исключать, что в период эксплуатации не будет какого-либо из особых воздействий или непроектной аварийной ситуации, которые приведут к полному или частичному исключению из работы конструкции или группы конструкций. В настоящее время нормативными документами рассматриваются вопросы в части исключения прогрессирующего лавинообразного обрушения конструкций, которое приводит к существенным социальным и экономическим последствиям. В то же время вопросы последующей работы конструкций, после аварии, практически не рассматриваются. Таким образом, исключается обрушение всего здания, а дальнейшая его судьба должна решаться в рамках действующих федеральных законов и норм, которые разработаны по большей части для проектирования новых зданий. Решения, связанные с демонтажем всех конструкций и строительством нового здания, не вызывают вопросов, но это не эффективно, если пострадало незначительное количество конструкций. Восстановить поврежденные конструкции не представляет сложности, а включить их в работу здания является уже сложной инженерной задачей, в особенности для вертикальных несущих конструкций зданий, расположенных в уровне нижних этажей (как правило, основные повреждения связаны именно с нижними этажами зданий и сооружений).

В этой связи рассмотрение вопросов, допускающих временную эксплуатацию конструкций здания, категория технического состояния которых может быть оценена как ограниченно-работоспособная, является необходимым в рамках восстановительного ремонта после особых воздействий.

ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Исследование причин, приведших к необходимости усиления строительных конструкций [1, 2], определяет, что до 9 % случаев связаны с аварийными ситуациями (рис. 1). Остальные причины, как правило, не приводят к значительному перераспределению усилий между конструкциями и позволяют выполнить локальное усиление.

Oleg A. Simakov, Candidate of Technical Sciences, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2040-7137, Scopus: 57193263878, ResearcherID: AAG-1930-2022, ORCID: 0000-0001-6665-4291, E-mail: simakova@mgssu.ru

Нормативными документами определены следующие расчетные ситуации, рассматриваемые в рамках проектирования зданий и сооружений:

- установившаяся, представляющая собой по сути режим нормальной эксплуатации построенного здания без изменений нагрузок, условий эксплуатации;
- аварийная — ситуация, соответствующая непроектной работе конструкции или здания в целом. Данный тип воздействий за редким специфическим исключением практически невозможно запланировать и предугадать. Соответственно рассматриваемые в рамках защиты от прогрессирующего обрушения сценарии предусматривают исключение из работы наиболее нагруженных конструкций, являющихся важными компонентами несущего каркаса здания (участки стен, колонны, пилоны, элементы несущих конструкций покрытия);
- переходная — ситуация с незначительной продолжительностью по отношению к сроку службы здания. Данный этап соответствует строительству, реконструкции и капитальному ремонту здания. Особых условий расчета для данного этапа не предусмотрено, в то же время этот этап представляет важную компоненту для формирования напряженно-деформированного состояния здания.

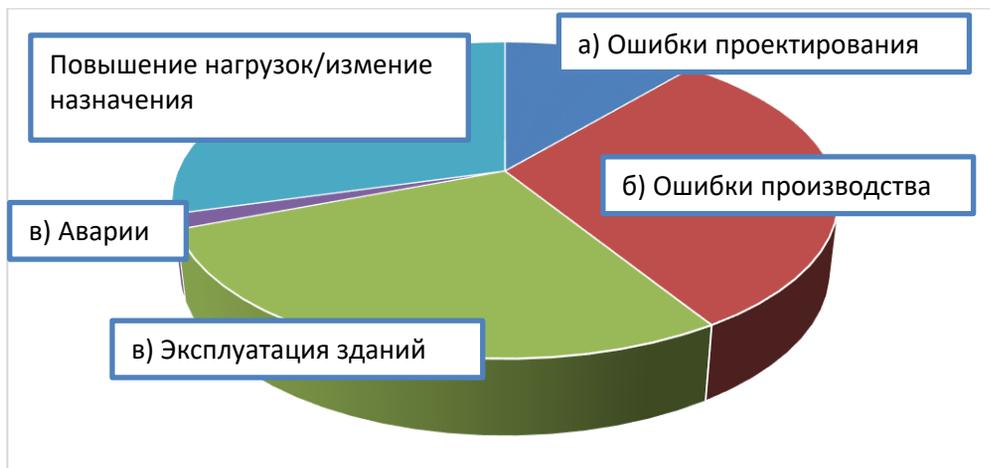


Рис. 1. Распределение причин восстановления конструкций
Fig. 1. Distribution of reasons for restoration of structures

Рассматривая аварийную расчетную ситуацию, задачами расчетного обоснования являются обеспечение:

- не превышение усилий в конструкциях и узлах несущей способности;
- не превышение деформаций элементов предельно допустимых деформаций.

В рамках определения предельно допустимых усилий, воспринимаемых несущими конструкциями, оперируют нормативными характеристиками, т.е., рассматривая железобетон по отношению к расчетным значениям прочности, мы можем фактически увеличить:

- прочность бетона на 30 % — переход от нормативного значения прочности к расчетному, также коэффициент увеличения прочности бетона при динамическом нагружении +15 %;
- прочность арматуры на 15 % — переход от нормативного значения прочности к расчетному.

Также учитывается целый ряд особенностей, в том числе перераспределение усилий, упругопластический характер деформирования и т.п. [3–6].

В целом можно говорить о примерном росте несущей способности на 15–30 % (с учетом ограничения предельных деформаций).

В то же время расчет выполняется на особое сочетание нагрузок, предполагающее:

- учет только постоянных и длительных нагрузок (в том числе пониженного значения кратковременных нагрузок);
- коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,0;
- коэффициент надежности по ответственности 1,0 (что существенно для зданий повышенного уровня ответственности).

Таким образом можно определить общее снижение нагрузок около 20–25 %.

ВОПРОС ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПОСЛЕ АВАРИИ

Рассмотрим пространственную задачу с удалением одного из конструктивных элементов (рис. 2).

Важно отметить, что рассматриваемый рамный каркас является статически неопределимой системой с возможностью перераспределения усилий в достаточно большом диапазоне.

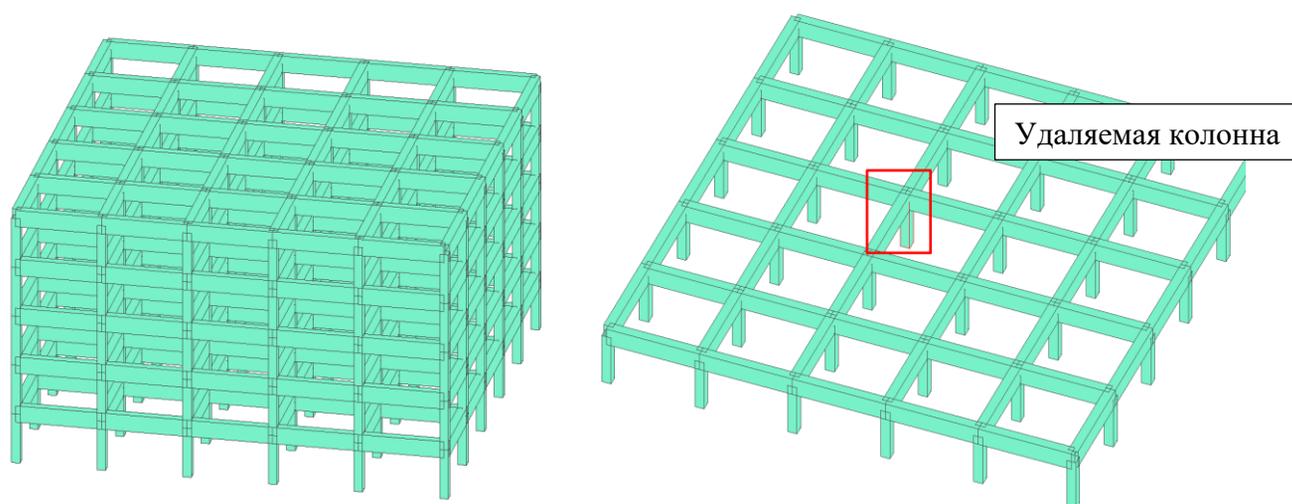


Рис. 2. Расчетная схема каркаса
Fig. 2. Calculation scheme of the frame

По результатам статического расчета в элементах действуют продольные силы в рамках основного сочетания нагрузок (рис. 3).

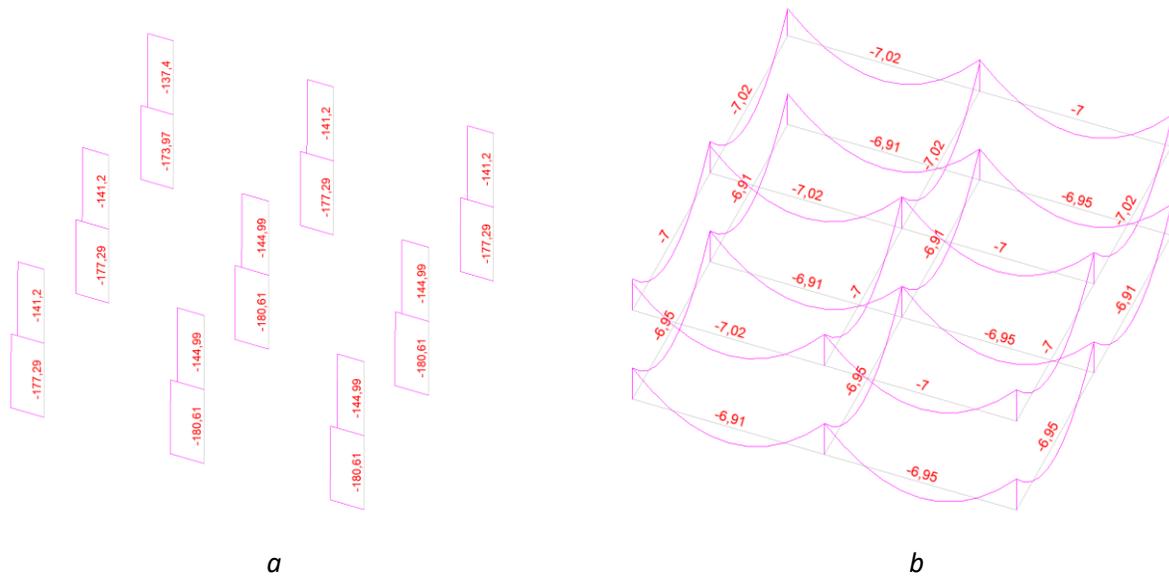


Рис. 3. Распределение усилий в элементах колонн и балок: *a* — продольные усилия; *b* — изгибающие моменты
Fig. 3. Distribution of forces in the elements of columns and beams: *a* — longitudinal forces; *b* — bending moments

Далее рассмотрим особую расчетную ситуацию — исключение рассматриваемой колонны и соответствующие усилия:

- рис. 4: расчетные усилия для расчета на защиту от прогрессирующего обрушения (результат расчета в динамической постановке);
- рис. 5: переходная расчетная ситуация после аварии. Расчетные усилия приняты с коэффициентами надежности, соответствующими установившейся расчетной ситуации.

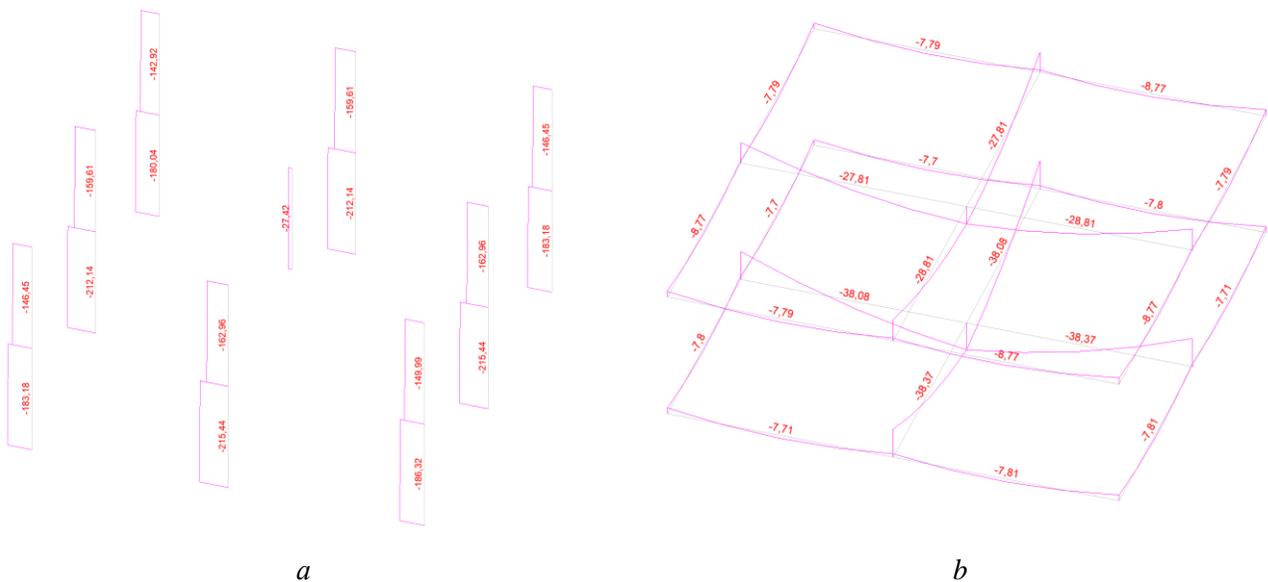


Рис. 4. Распределение усилий в элементах колонн и балок при удаленной колонне, расчетные нагрузки, как для случая защиты от прогрессирующего обрушения: *a* — продольные усилия; *b* — изгибающие моменты
Fig. 4. Distribution of forces in the elements of columns and beams with the column removed, design loads as for the case of protection against progressive collapse: *a* — longitudinal forces; *b* — bending moments

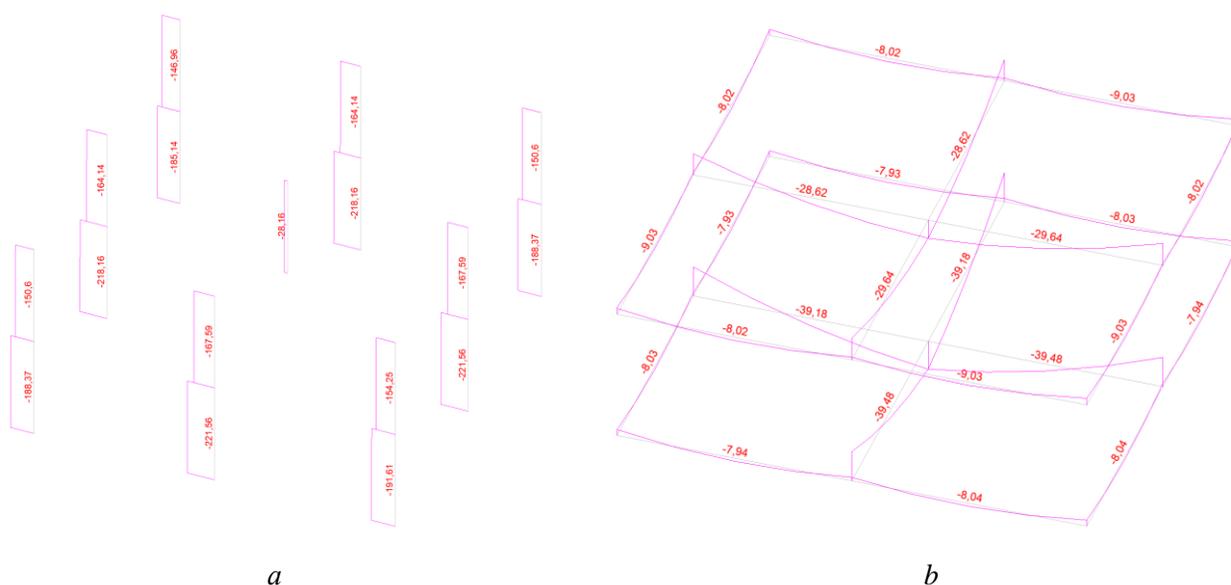


Рис. 5. Распределение усилий в элементах колонн и балок при удаленной колонне с нагрузками, соответствующими установившейся расчетной ситуации: *a* — продольные усилия; *b* — изгибающие моменты
Fig. 5. Distribution of forces in the elements of columns and beams with a removed column with loads corresponding to the established design situation: *a* — longitudinal forces; *b* — bending moments

Таким образом, на данной простой для анализа расчетной схеме можно увидеть изменение НДС в рамках аварийной и поставарийной расчетной ситуации. Следует обратить внимание, что усилия при расчете конструкций на этапе защиты от прогрессирующего обрушения превышают исходные на величины:

- продольные усилия в колоннах на 20 %;
- изгибающие моменты в балках на 300–400 %.

С учетом увеличения в рамках расчета на прогрессирующее обрушение расчетных характеристик материалов мы можем говорить о том, что несущая способность вертикальных конструкций, скорее всего, будет обеспечена без специальных мероприятий. В то же время изгибаемые конструкции более требовательны к обеспечению несущей способности при аварийной ситуации.

В целом эти выводы подтверждаются анализом аварий на реальных объектах с тем исключением, что фактически мы имеем близкий, но все же отличающийся механизм работы конструкций. Включаются непроектные факторы в перераспределение усилий:

- сложные механизмы работы железобетона за пределами упругопластической работы, что ведет к существенному перераспределению усилий;
- наличие перегородок из пеноблока и кирпича (подтверждено на реальных объектах, что данные конструкции включаются в работу и далее при их разборке с целью усиления железобетонных конструкций фиксируют дополнительные перемещения перекрытий над ними).

В целом с защитой от прогрессирующего обрушения с учетом действующих нормативных документов, а также исследований [7–11] в настоящее время отсутствуют сложности с расчетным обоснованием и конструированием элементов.

Остается вопрос, что делать дальше, после аварии (конечно, при условии, что здание не разрушилось). Если следовать требованиям федеральных законов и нормативных доку-

ментов, мы должны выполнить расчеты измененной конструктивной схемы здания, по результатам которых может быть установлена категория технического состояния:

- аварийное техническое состояние конструкций (с необходимым отселением жильцов), далее принимается решение о сносе или реконструкции объекта;
- ограниченно-работоспособное техническое состояние. В данном случае можно выполнять усиление (в том числе в рамках капитального ремонта) с учетом мероприятий, которые исключают переход перегруженных конструкций в аварийное техническое состояние.

В целом алгоритм понятен, но наибольшее затруднение вызывает вопрос определения времени включения конструкции усиления в работу.

Рассмотрим на том же примере этап:

- возведения удаленной (разрушенной, поврежденной) колонны (рис. 6, *a*);
- включения в работу возведенной колонны за счет ползучести бетона перегруженных колонн (рис. 6, *b*).

При этом учитывается, что на период возведения конструкций действуют проектные нагрузки в полном объеме, т.е. не производится разгрузка конструкций. Это в целом характерно для реальных объектов, так как включить в работу колонну с проектным продольным усилием больше 500 тс практически не решаемая задача. В то же время при условной перегрузке колонн в зоне влияния удаленной колонны формируются усилия, превышающие 80 % от прочности бетона, что ведет к развитию ползучести бетона. Учитывая данный факт, можно предполагать включение в работу возведенной конструкции в течение некоторого времени.

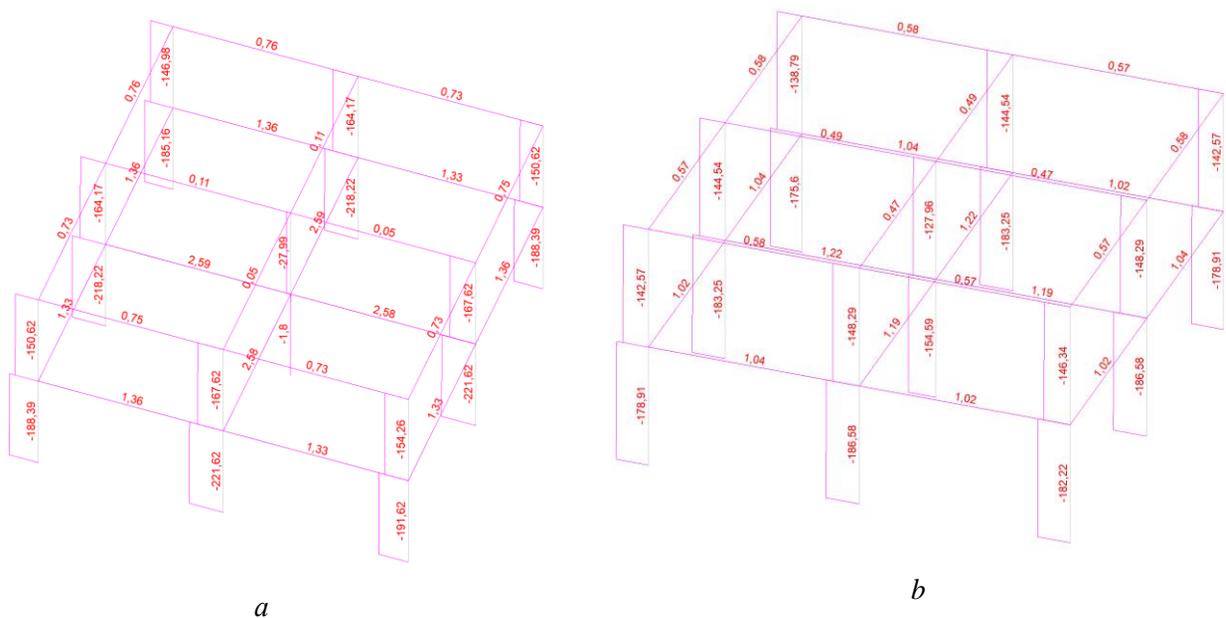


Рис. 6. Продольные усилия в колоннах при возведении исключенной колонны:
a — начальный этап; *b* — включение в работу

Fig. 6. Longitudinal forces in columns during the construction of an excluded column:
a — initial stage; *b* — inclusion in the work

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Рассматривая полученные результаты на тестовом относительно простом примере, можно провести некоторую аналогию с реальными объектами.

На рис. 7 изображен фрагмент исключения несущего элемента из расчетной схемы здания.

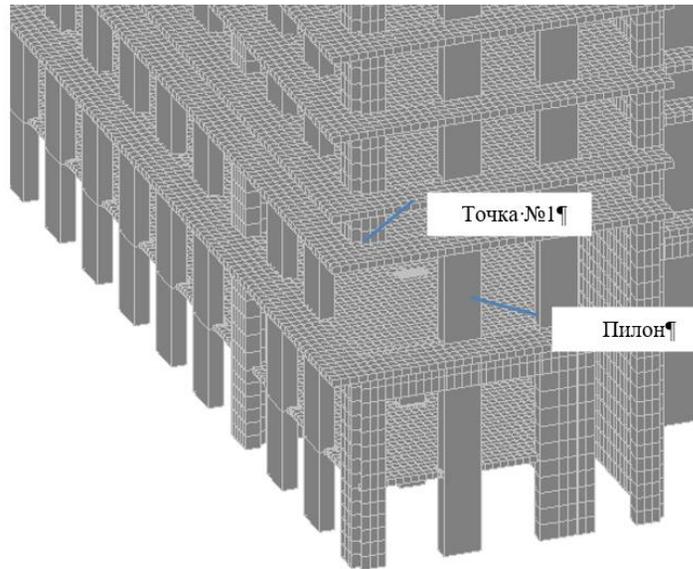


Рис. 7. Схема расположения исключаемого из расчетной схемы элемента и контрольной точки и колонны
Fig. 7. Layout of the element excluded from the calculation scheme, the control point and the column

Расчет в динамической постановке позволяет построить диаграммы изменения во времени различных величин (например, перемещения вертикальные для точки над удаленной колонной (рис. 8) и продольные усилия в колонне (рис. 9), расположенной рядом с удаленным элементом). Можно обратить внимание, что экстремальные значения усилий характерны только для расчетной аварийной ситуации — небольшой зоне на диаграмме с наибольшими значениями усилий, далее в рамках стабилизации усилия незначительно уменьшаются.

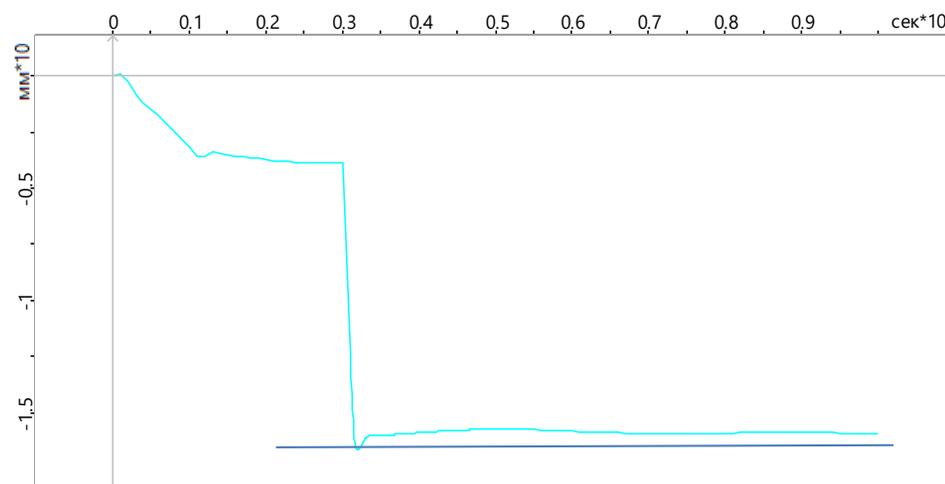


Рис. 8. График перемещения контрольной точки во времени
Fig. 8. Graph of the movement of the checkpoint over time

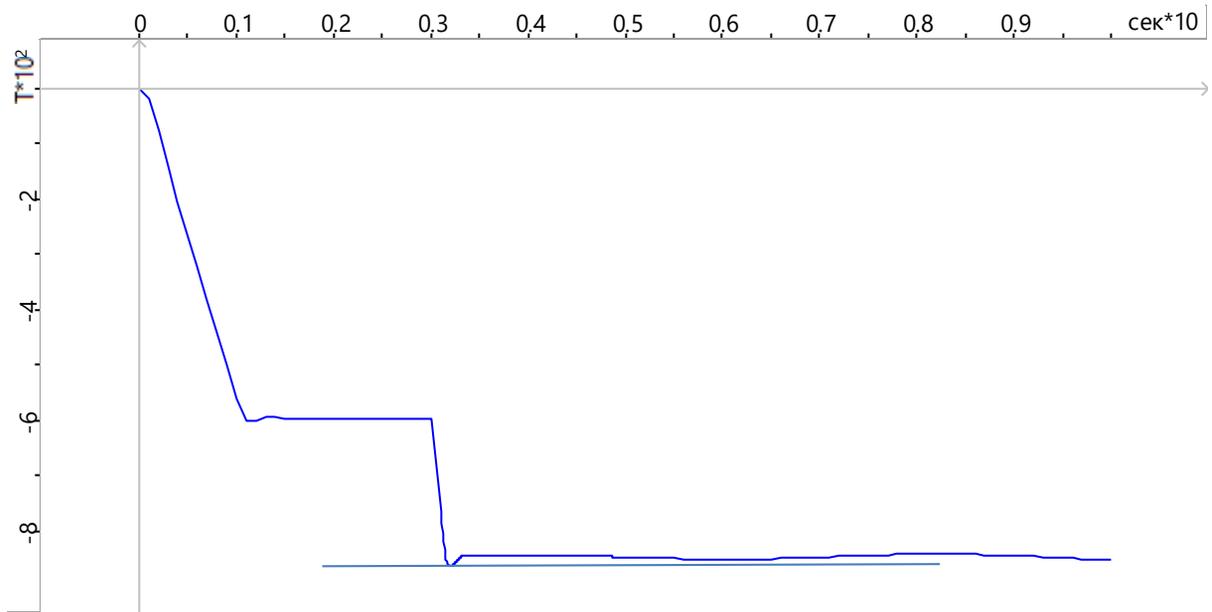


Рис. 9. График изменения продольных усилий в колонне во времени
Fig. 9. Graph of changes in longitudinal forces in a column over time

Необходимо обратить внимание, что за пиковым значением усилий наблюдается незначительное падение усилий, при этом в ходе определения несущей способности в соответствии с действующими нормативными документами допускается применять коэффициенты, учитывающие повышение прочности материалов при динамическом воздействии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагается в рамках расчета на прогрессирующее обрушение введение особой поставарийной расчетной ситуации, которая рассматривает некоторую область за пределами пиковых значений усилий, при этом исключая коэффициенты динамического упрочнения материалов.

Также автор считает значимым рассмотрение вопроса в нормативных документах о введении дополнительной расчетной ситуации в рамках включения в работу конструкций усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены механизмы перераспределения усилий в статически неопределимых системах в рамках аварийной расчетной ситуации, а также далее после достижения пиковых усилий. Сделан вывод о наличии области работы конструкции за пределами аварийной расчетной ситуации, для которой характерно незначительное снижение усилий, при этом несущая способность с учетом исключения коэффициентов динамического упрочнения материалов снижается. Таким образом защита от прогрессирующего обрушения при определенных условиях может быть не обеспечена.

2. Определена важность детальной проработки вопросов восстановления конструкций здания после аварийной расчетной ситуации в части учета этапа включения конструкций усиления в работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симаков О.А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2019. № 1. С. 76–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84
2. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирования срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
3. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М. : АСВ, 2013. 128 с.
4. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102 (2). No. 10214.
5. Федорова Н.В., Халина Т.А. Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 8. С. 32–36.
6. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. P. 032037.
7. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.
8. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2018. Т. 4. № 78. С. 42–52.
9. Галютудинов З.Р. Исследование железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 28–36.
10. Чернов Ю.Т., Петров И.А. Определение эквивалентных статических сил при расчете систем с выключающимися связями // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 98–101.
11. Ву Нгок Тuyen. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 73–84.

REFERENCES

1. Simakov O.A. Analysis of factors causing the need for strengthening of reinforced concrete constructions. *Stroitel'stvo i rekonstrukciâ*. 2019; 1:76-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84 (in Russian).
2. Tamrazyan A.G. Methodology for analyzing and assessing the reliability of the state and predicting the service life of reinforced concrete structures. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):5-18. (in Russian).
3. Almazov V.O., Kao Zuy Kkhoy. *Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-story frames*. Moscow, ASV, 2013; 128. (in Russian).
4. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 102(2):10214.
5. Fedorova N.V., Khalina T.A. Study of dynamic additional loads in reinforced concrete structural systems during sudden structural changes. *Industrial and civil engineering*. 2017; 8:32-36. (in Russian).
6. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032037.
7. Kodysh E.N. Design of protection of buildings and structures from progressive collapse, taking into account the occurrence of a special limit state. *Industrial and civil engineering*. 2018; 10:95-101. (in Russian).
8. Fedorova N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T. Methodology for experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts. *Construction and reconstruction*. 2018; 4(78):42-52. (in Russian).
9. Galyautdinov Z.R. Study of reinforced concrete beams on yielding supports under short-term dynamic loading. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):28-36 (in Russian).
10. Chernov Yu.T., Petrov I.A. Determination of equivalent static forces when calculating systems with switchable connections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2012; 4:98-101. (in Russian).
11. Vu Ngok Tuyen. Study of the survivability of a reinforced concrete structurally nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic setting. *Construction and reconstruction*. 2020; 4(90):73-84. (in Russian).