

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 109–119.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 109–119.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119

EDN: INTTVI

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛОНН И СВЯЗЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗДАНИЯ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Иван Иванович Подшивалов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Объектом исследования является экспериментальный пятиэтажный сборно-монолитный безригельный каркас здания с подвалом системы КУБ 2.5 с уровнем ответственности КС-2.

Целью работы являлась расчетная оценка возможности прогрессирующего обрушения каркаса здания при выключении средней колонны в подвале с помощью трех методов – квазистатического и динамического, а также кинематического метода предельного равновесия.

Моделирование напряженно-деформированного состояния сборно-монолитного железобетонного каркаса выполнено в ПВК Ing+ MicroFe с разработкой пространственной конечно-элементной модели.

Полученные *результаты* показали невозможность прогрессирующего обрушения каркаса при удалении средней колонны в подвале экспериментального здания.

При сравнении результатов расчета каркаса от прогрессирующего обрушения тремя методами получена сходимость результатов по предельной нагрузке в колоннах и связях в пределах 15 %. Динамический метод расчета показал более высокие значения предельной нагрузки по сравнению с квазистатическим и кинематическим методом предельного равновесия.

Ключевые слова: сборно-монолитный каркас, прогрессирующее обрушение, выключение колонны, расчетная модель, напряженное состояние

Для цитирования: Подшивалов И.И. Моделирование напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения расчетными методами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 109–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119. EDN: INTTVI

ORIGINAL ARTICLE

COMPUTATIONAL MODELING OF PROGRESSIVE COLLAPSE-INDUCED STRESS-STRAIN STATE OF COLUMNS AND ASSEMBLIES IN EXPERIMENTAL BUILDING**Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. Purpose: The aim of this work is to evaluate the probability of progressive collapse due to the removed column in a basement of the experimental building using three computational methods – quasi-static, dynamic and kinematic methods of the limit equilibrium.

Methodology/approach: The stress-strain state of the semi prefabricated building system is performed by the finite element method using the verified software package Ing+ MicroFe.

Research findings: It is shown that no progressive collapse can occur with the removed column in a basement of the experimental building. A 15 % precision is obtained in comparing calculation results of the progressive collapse by three methods of the limit equilibrium. The dynamic approach provides larger values of the ultimate load than the quasi-static and kinematic approaches.

Keywords: semi prefabricated building system, progressive collapse, removed column, computational model, stress-strain state

For citation: Podshivalov I.I. Computational Modeling of Progressive Collapse-Induced Stress-Strain State of Columns and Assemblies in Experimental Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 109–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119. EDN: IHTTVI

Сборно-монолитное исполнение каркаса позволяет максимально эффективно использовать преимущества монолитного и сборного домостроения [1]. Одним из главных достоинств монолитных конструкций является возможность строительства зданий практически любой формы. В свою очередь, основным преимуществом сборных конструкций выступает возможность устройства стен и перекрытий заводского изготовления. В сборно-монолитном домостроении наблюдается, с одной стороны, завышенная оценка эффективности конструктивных решений [2], а с другой – существует недостаточная экспериментальная база данных для объективного анализа несущей способности, жесткости и трещиностойкости конструкций [3].

Применение монолитного ребристого перекрытия по сравнению с плоским позволяет получить конструкцию с более высокой несущей способностью, жесткостью и трещиностойкостью, а также приводит к уменьшению расхода бетона и арматуры [4]. Однако в жилых зданиях, из-за малой высоты помещений, устройство ригелей нежелательно [5].

В исследовании [6] предложен сборно-монолитный каркас здания повышенной этажности, в котором пространственная устойчивость обеспечивается арматурным соединением и замоноличиванием сборных панелей-рам, монолитных участков ригелей и дисков сборных плит перекрытий. Для защиты от прогрессирующего обрушения предусмотрено расчленение каркаса на отдельные фрагменты с шарнирным соединением между собой.

Живучесть, по определению проф. В.Д. Райзера [7], – это свойство конструкций сохранять при аварийных воздействиях способность к выполнению основных функций, не допуская лавинообразного (каскадного) разрушения. Здание следует проектировать таким образом, чтобы в случае разрушения какого-либо элемента весь объект или его наиболее ответственная часть сохраняли работоспособность в течение времени, достаточного для принятия срочных мер [8].

В настоящее время для повышения безопасности зданий и сооружений, и тем самым сохранения жизни людей, стало необходимым учитывать запроектные нагрузки [9, 10, 11, 12]. Расширился перечень зданий, подлежащих расчету от прогрессирующего обрушения¹ до уровня ответственности КС-2. Устойчивость от прогрессирующего обрушения проверяется расчетом на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные и временные длительные нагрузки [13]. В случае локального разрушения отдельных элементов, конструктивная система должна обладать способностью перераспределять усилия между сохранившимися конструкциями. Расчет от прогрессирующего обрушения выполняется при использовании пространственных расчетных моделей [14]. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Устойчивость здания к прогрессирующему обрушению обеспечивается рассмотрением различных сценариев исключения несущих элементов. При необходимости проектируются дополнительные связевые элементы или повышается локальная несущая способность элементов конструкции.

Учет динамического эффекта при удалении колонны на заданный временной интервал может быть выполнен пошаговым способом путем увеличения силы P_z в узле конечно-элементной модели до значения, равного усилию в удаленной колонне при статическом нагружении [15]. Затем происходит мгновенное снятие этой силы, что вызывает появление собственных колебаний и динамический эффект [16].

Параметры прогрессирующего обрушения определяются путем учета нагрузки от выключенного из работы конструктивного элемента, реакция от которого может приниматься следующим образом: мгновенное удаление выключаемого конструктивного элемента в первичной расчетной схеме (ПРС) моделируется внутренними усилиями, прикладываемыми во вторичной расчетной схеме (ВРС) с обратным знаком – коэффициент моделирования усилий $K = 1$, что соответствует максимально невыгодному условию при динамическом коэффициенте $K_d = 2$ (например, продольная сила, возникающая в выключенной колонне, прикладывается в верхний узел и направлена сверху вниз). По этим параметрам выполняется расчет от прогрессирующего обрушения квазистатическим методом.

Как известно, в теории предельного равновесия отдельный элемент в конструкции не может разрушиться, может разрушиться вся конструкция. При расчете кинематическим методом теории предельного равновесия в ВРС рассматривается состояние конструктивной системы в момент удаления колонны, когда реакция (продольная сила и два изгибающих момента) прикладывается с противоположным знаком. При расчете стержневых элементов вво-

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

дятся две опции – задание многомерных элементных шарниров и определение несущей способности конструктивных элементов по предельным поверхностям. Далее выполняется расчет по типу квазистатического.

При динамическом расчете в ВРС выключается какой-либо конструктивный элемент, реакция от выключенного элемента принимается с измененным знаком с коэффициентом моделирования усилий $K = 1$. Нагружение расчетной модели производится в три этапа².

1. Перед выключением из работы конструктивного элемента, для получения корректного квазистатического напряженно-деформированного состояния конструкции, приложение нагрузки от выключенной из работы колонны производится линейно от 0 до 100 % на протяжении 15 с (примерно два периода собственных колебаний).

2. Выключение конструктивного элемента из работы происходит за 0,01 с при основном периоде собственных колебаний колонны 0,1 с.

3. Расчет с удаленным конструктивным элементом в динамической постановке выполняется в течение следующих 25 с (общий интервал времени 40 с).

Результатом динамического расчета является определение максимумов динамического воздействия во временной области от выключенного из работы элемента, по типу воздействия являющегося особым, на которое выполняется конструктивный расчет элементов каркаса.

Рассматриваемое экспериментальное пятиэтажное двухподъездное здание с подвалом прямоугольной формы в плане имеет размеры по осям 43,34×12 м, запроектировано для строительства в Кемеровской области. Высота здания составляет 18,65 м. По уровню ответственности здание относится к классу КС-2 как экспериментальное, подлежит расчету от прогрессирующего обрушения.

Конструктивная схема здания представляет собой сборно-монолитный безригельный каркас, который состоит из сборных железобетонных колонн сечением 400×400 мм и жестких дисков перекрытий толщиной 160 мм. Объединение колонн в единую пространственную систему выполняется за счет жесткого соединения сборных панелей перекрытий с колоннами через сварку закладных деталей. Дополнительная жесткость обеспечивается за счет соединения сборных панелей перекрытий петлевыми арматурными выпусками по периметру панелей с последующим замоноличиванием всех стыковых соединений.

По заданной конструктивной схеме здания была разработана расчетная модель в программном комплексе Ing+2021 MicroFe. Плоскостные элементы моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», колонны и связи – конечным элементом типа «стержень». Расчетная модель здания приведена на рис. 1.

Расчет каркаса здания от прогрессирующего обрушения в ВРС выполнялся тремя методами:

- квазистатическим методом;
- кинематическим методом теории предельного равновесия;
- динамическим методом.

² Методическое пособие. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Москва, 2018. С. 156.

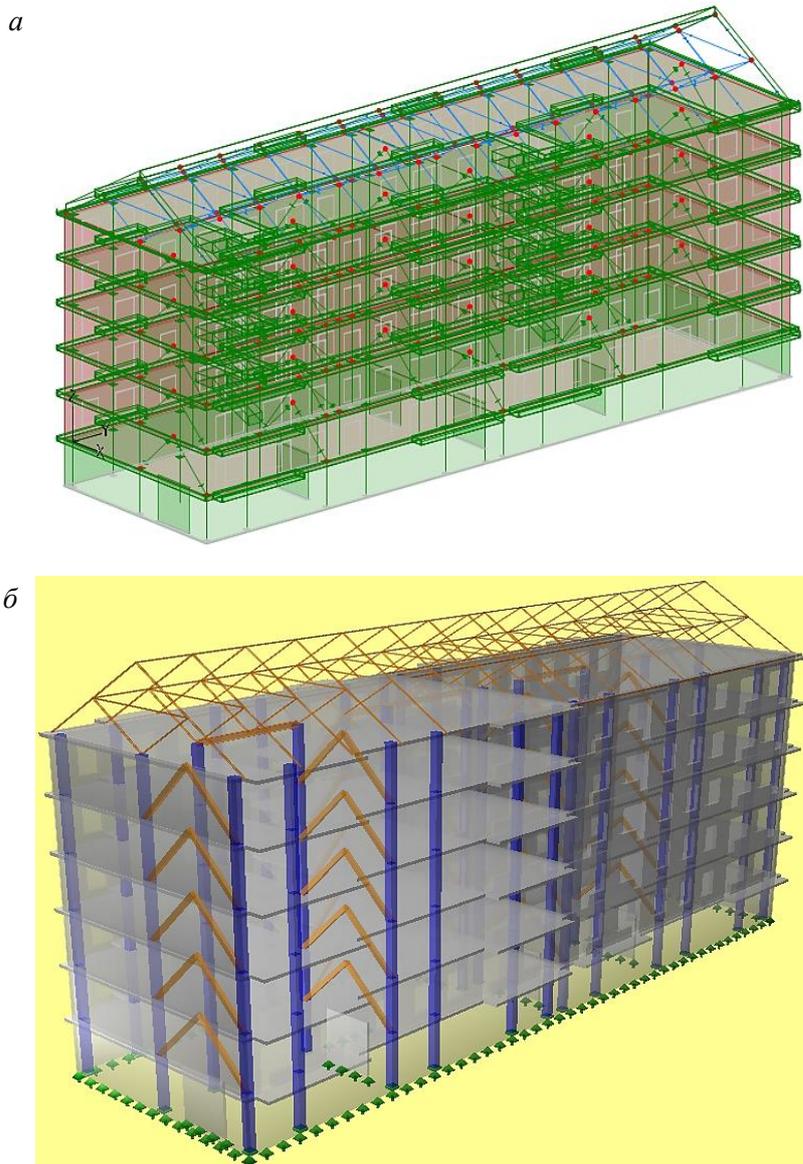


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б)
 Fig. 1. Computational FEM (a) and visualization (b)

При расчете от прогрессирующего обрушения квазистатическим методом при выключении средней колонны в подвале были получены изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса (рис. 2). Анализ данных показывает, что наибольшие продольные усилия возникли в оставшихся средних колоннах подвала, достигнув значения $N_{\max} = -1403,6$ кН. При заданном армировании максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса составило $K_{\text{испmax}} = 0,694 < 1$, что обозначает отсутствие пластических шарниров в рассматриваемых элементах.

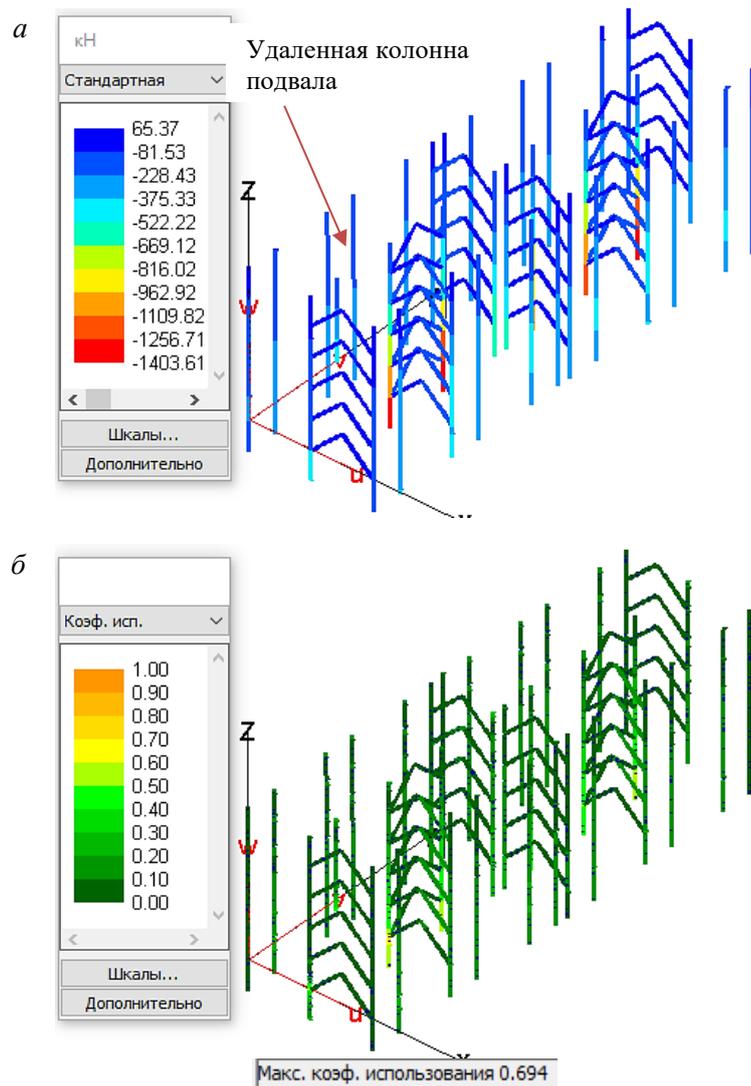


Рис. 2. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете квазистатическим методом

Fig. 2. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by quasi-static method

Расчет от прогрессирующего обрушения выполнен кинематическим методом теории предельного равновесия при выключении средней колонны в подвале. Изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса приведены на рис. 3. Как видно из результатов, наибольшие продольные усилия, аналогично предыдущему случаю, возникли в оставшихся средних колоннах подвала и составили $N_{\max} = -1432,7$ кН. Максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса равно $K_{\text{испmax}} = 0,739 < 1$, что также указывает на отсутствие пластических шарниров в элементах конструкции.

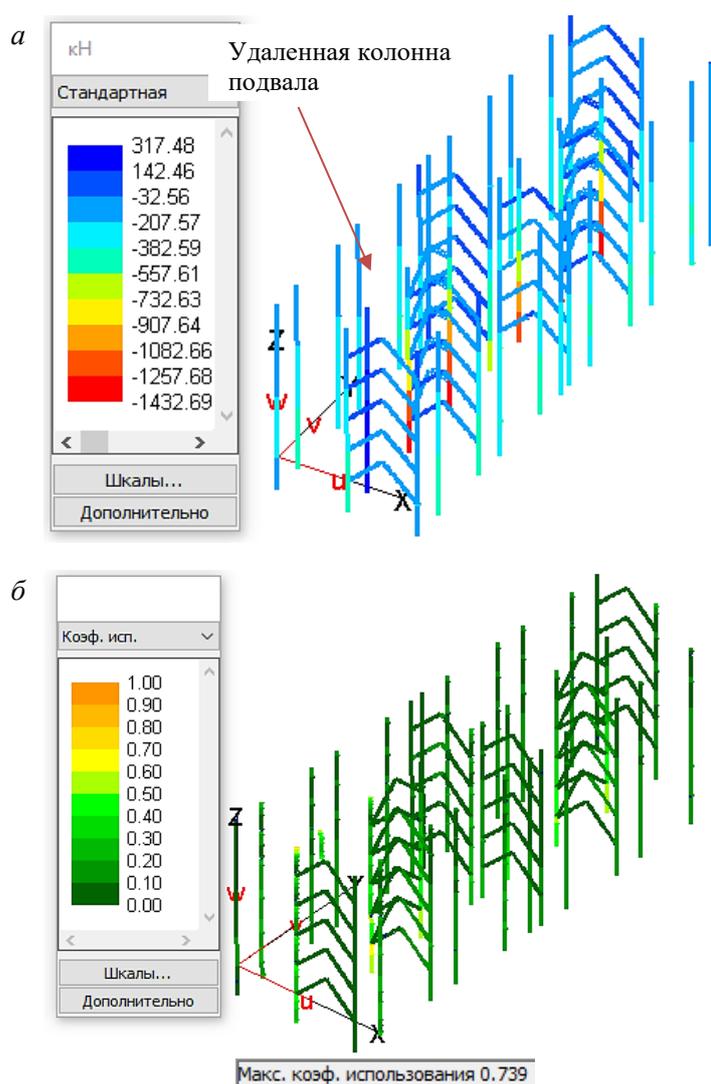


Рис. 3. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете кинематическим методом теории предельного равновесия

Fig. 3. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by kinematic method

При расчете от прогрессирующего обрушения динамическим методом при выключении средней колонны в подвале были получены изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса (рис. 4). Рисунок демонстрирует, что наибольшие продольные усилия в оставшихся средних колоннах подвала увеличились, по сравнению с предыдущими случаями, и составили $N_{\max} = -1901,2$ кН. Максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса также возросло и достигло $K_{\text{исп max}} = 0,739 < 1$, что означает отсутствие пластических шарниров в этих элементах.

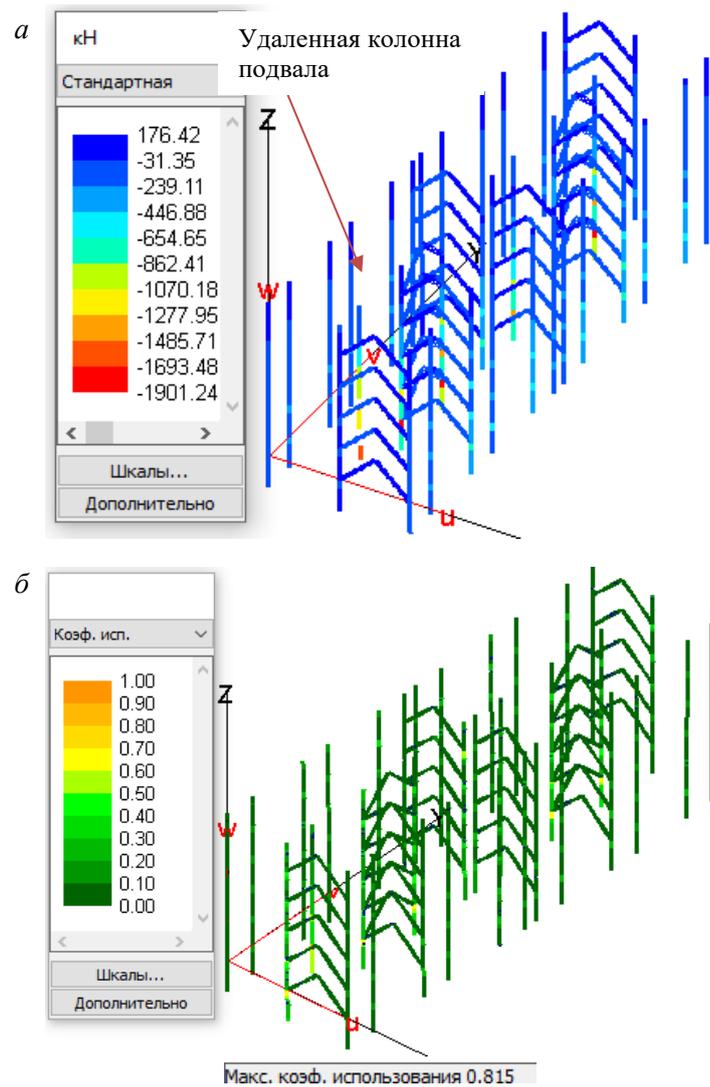


Рис. 4. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете динамическим методом

Fig. 4. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by dynamic method

В качестве пояснений к динамическому расчету (рис. 5) показано задание коэффициентов динамических параметров от статической нагрузки и от реакции удаленной колонны в подвале. Коэффициент $K = 1$ обозначает принятие полной величины нагрузки. График изменения динамической реакции от удаленной колонны подвала приведен на рис. 6. Из данных графика следует, что наибольшее значение продольного усилия в колонне первого этажа, вызванном удалением колонны подвала, составляет $\text{Min} = -1640$ кН, что хорошо коррелируется со значениями продольного усилия в колонне первого этажа над удаленной колонной подвала (см. рис. 4, а).

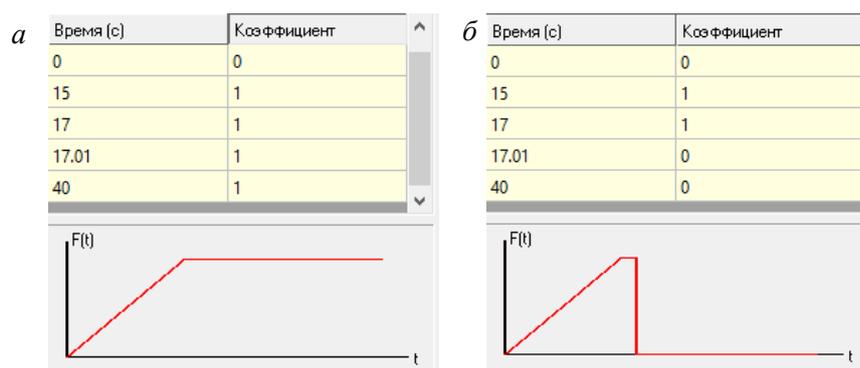


Рис. 5. Задание коэффициентов динамических параметров:

a – от статической нагрузки; *б* – от реакции удаленной колонны в подвале

Fig. 5. Stipulation of dynamic parameter coefficients: *a* – from static load; *b* – from removed column response

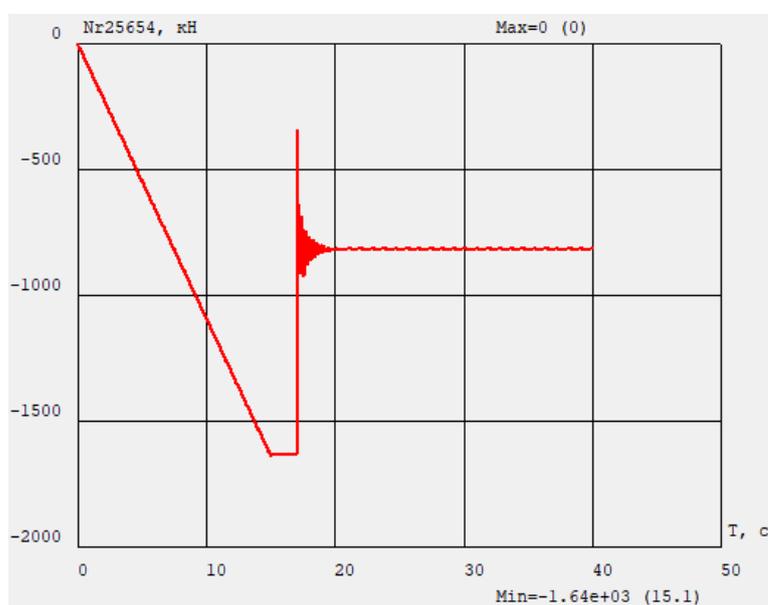


Рис. 6. Динамическая реакция от удаленной колонны в подвале

Fig. 6. Dynamic response from the removed column in the basement

Выводы

Полученные результаты показали невозможность прогрессирующего обрушения каркаса при удалении средней колонны в подвале экспериментального здания.

В заключение можно отметить, что при сравнении результатов расчета от прогрессирующего обрушения, выполненных квазистатическим методом, кинематическим методом теории предельного равновесия и динамическим методом, была получена сходимость результатов по предельной нагрузке в колон-

нах и связях в пределах 15 %. При этом квазистатический и кинематический методы дают нижнее значение по предельной нагрузке в колоннах и связях каркаса, а динамический метод демонстрирует верхнее значение.

Таким образом, неиспользование динамического метода расчета может привести к результату с заниженными значениями предельной нагрузки в колоннах и связях сборно-монолитного железобетонного каркаса экспериментального здания системы КУБ 2.5.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Унифицированная система* сборно-монолитного каркаса КУБ 2.5. Выпуск 1-1. Москва : Стройиздат, 1990. 49 с.
2. *Митасов В.М., Коянкин А.А.* Работа диска сборно-монолитного перекрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 3. С. 103–104.
3. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28–35.
4. *Маковский С.А., Новиков М.В., Маковская Т.А.* Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния монолитного перекрестно-ребристого перекрытия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 91–96. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-91-96. EDN: YTPQIJ
5. *Яров В.А., Скрипальщиков К.В.* Безригельные монолитные перекрытия многоэтажных зданий с колоннами крестового сечения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2. С. 97–91.
6. *Клюева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С.* Прочность и деформативность сборно-монолитных каркасов жилых зданий пониженной материалоемкости при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 5–9.
7. *Райзер В.Д.* К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77–78.
8. *Краснощечков Ю.В., Мельникова С.О., Екимов А.А.* Живучесть многоэтажного здания со связевым каркасом // Вестник СибАДИ. 2016. Вып. 2 (48). С. 100–104.
9. *Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В.* Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN: YXLQNV
10. *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.
11. *Алмазов В.О., Кхой Као Зуй.* Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. Москва : Изд-во АСВ, 2013. 128 с.
12. *Ведяков И.И., Ефремов П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В.* Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN: ZIJLAD
13. *Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А.* Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 9–13.
14. *Кабанцев О.В., Тамразян А.Г.* Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2. EDN: SKHSAV
15. *Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Цуриков С.Г., Лукьянов В.И.* Расчет железобетонного каркаса здания с учетом аварийного воздействия во временной области // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2.
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. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190. EDN: JQQQZE

REFERENCES

1. Unified Reinforced Concrete Composite Frame KUB 2.5. Issue 1-1. Moscow: Stroiizdat, 1990. 49 p. (In Russian)
2. *Mitasov V.M., Koyankin A.A.* Disc Operation of Reinforced Concrete Composite Slab. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2014; (3): 103–104. (In Russian)
3. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Prefabricated Solid Building Frame and its Properties in Different Life Cycles. *Vestnik MGSU*. 2015; (9): 28–35. (In Russian)
4. *Makovskii S.A., Novikov M.V., Makovskaya T.A.* Finite Element Analysis of the Stress-Strain State of Cast-in-Place Beam-and-Slab Floor. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*. 2017; (2): 91–96. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-91-96 (In Russian)
5. *Yarov V.A., Skripal'shchikov K.V.* Reinforced Concrete Composite Frame without Collar Beams with X Cross-Section. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; (2): 97–91. (In Russian)
6. *Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Bukhtiyarova A.S.* Strength and Deformability of Prefabricated Monolithic Frames of Residential Buildings of Reduced Material Intensity under Off-Design Impacts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (1): 5–9. (In Russian)
7. *Raizer V.D.* Toward the Building Robustness. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2012; (5): 77–78. (In Russian)
8. *Krasnoshchekov Yu.V., Mel'nikova S.O., Ekimov A.A.* Survivability of Multi-Floor Building with Braced Framing. *Vestnik SibADI*. 2016; 48 (2):100–104. (In Russian)
9. *Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'ev E.V.* Building Protection Against Progressive Collapse in Terms of Legal and Regulatory Documents. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (2): 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02 (In Russian)
10. *Kodysh E.N.* Design Protection of Buildings Against Progressive Collapse, with Respect to Limit State. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (1): 95–101. (In Russian)
11. *Almazov V.O., Kkhai Kao Zui.* Dynamics of Progressive Collapse of Reinforced Concrete Composite Frames of Multi-Floor Buildings. Moscow: ASV. 128 p. (In Russian)
12. *Vedyakov I.I., Efremov P.G., Odesskii P.D., Popov N.A., Solov'ev D.V.* Progressive Collapse Analysis of Buildings: Normative Requirements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (4): 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04 (In Russian)
13. *Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A.* Protection of Multi-Floor Buildings Against Progressive Collapse. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (6): 9–13. (In Russian)
14. *Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G.* Consideration of Changes in Design Diagram in Structural Analysis. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014; (5): 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2 (In Russian)
15. *Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Tsurikov S.G., Luk'yanov V.I.* Strength Analysis of Reinforced Concrete Frame of the Building, with Respect to Possible Collapse Impact. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015; (2): 15. (In Russian)
16. *Podshivalov I.I.* Progressive Collapse Analysis of Experimental Building Skeleton Based on Stress-Strain State of Columns and Joints. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 180–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190. EDN: JQGQZE (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodshivalov@list.ru

Author Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodshivalov@list.ru

Статья поступила в редакцию 03.12.2024
 Одобрена после рецензирования 16.01.2025
 Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 03.12.2024
 Approved after review 16.01.2025
 Accepted for publication 21.04.2025