

Строительные конструкции, здания и сооружения

Structural units, buildings, structures

Научная статья

УДК 69.07

DOI: 10.14529/build250405

РАСЧЁТ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ РАЗРУШЕНИЕ ПЛИТЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Ю.А. Иващенко, А.И. Пастухов[✉]

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉]ntvffhntvf@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются результаты расчетов железобетонной плиты фундамента на упругом основании. Представлена методика проведения исследования и алгоритм расчёта лавинообразного разрушения плиты с помощью ЭВМ в программном комплексе ЛИРА-САПР. Проведен анализ каждого вида нагрузки и определение наиболее влиятельной. Прогрессирующее разрушение происходит вследствие накопления локальных разрушений в плите из-за внутренних дефектов конструкции. Причинами ослаблений могут быть ошибки проектирования или технологии строительства. Выполнен поиск наиболее опасного варианта развития локального разрушения при минимальном количестве выключенных элементов из-за внутренних дефектов. Разрушение из-за внутренних дефектов приводит к перенапряжению в других элементах, увеличению вертикальных перемещений и давления на грунт, что приводит к эффекту домино. Определены размеры критической площади для трёх случаев. Первый случай – расположение колонны внутри плиты фундамента, второй – на краю и третий – на углу плиты. Проведен анализ плиты в трёх случаях при приложении всех нагрузок на фундамент. Заключительный этап анализа – добавление к фундаменту каркаса здания, чтобы учесть его влияние при прогрессирующем разрушении.

Ключевые слова: фундаментная плита, прогрессирующее разрушение, критическая площадь, локальное разрушение

Для цитирования. Иващенко Ю.А., Пастухов А.И. Расчёт на прогрессирующее разрушение плиты на упругом основании // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 4. С. 45–51. DOI: 10.14529/build250405

Original article

DOI: 10.14529/build250405

CALCULATION FOR PROGRESSIVE FRACTURE OF A PLATE ON AN ELASTIC BASE

Yu.A. Ivashenko, A.I. Pastukhov[✉]

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉]ntvffhntvf@mail.ru

Abstract. The article discusses the results of calculations of a reinforced concrete foundation slab on an elastic base. A research methodology and an algorithm for calculating avalanche-like plate destruction using a computer in the Lira CAD software package are presented. The analysis of each type of load and the determination of the most influential is carried out. Progressive destruction occurs due to the accumulation of local damage in the slab due to internal structural defects. The reasons for the weakness may be design errors or construction technology. A search has been performed for the most dangerous variant of the development of local destruction with a minimum number of switched-off elements due to internal defects. Destruction due to internal defects leads to overvoltage in other elements, increased vertical movements and pressure on the ground, which leads to a domino effect. The sizes of the critical area for three cases are determined. The first case is the location of the column inside the foundation slab, the second is at the edge and the third is at the corner of the slab. The slab was analyzed in three cases when all loads were applied to the foundation. The final stage of the analysis is the addition of the building's frame to the foundation in order to take into account its impact during progressive destruction.

Keywords: foundation plate, progressive destruction, critical area, local destruction

For citation. Ivashenko Yu.A., Pastukhov A.I. Calculation for progressive fracture of a plate on an elastic base. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2025;25(4):45–51. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250405

Введение

Тема прогрессирующего обрушения впервые появляется в 1968 г. после аварии в жилом 22-этажном здании Ronan Point в Лондоне. Данный случай положил начало исследованию этой проблемы. В ряде стран Западной и Восточной Европы были приняты требования по учёту сопротивления от прогрессирующего обрушения под действием экстремальных локальных нагрузок, пересмотрены существующие нормы и предложены способы защиты. В работе Д.Д. Сергеева [1] рассматриваются случай и приводятся отечественные варианты по предотвращению прогрессирующего разрушения. В отчёте [2] также анализируется событие 1968 года и приводятся европейские наработки для защиты зданий. Учёные из разных стран пришли к одним и тем же выводам и очень схожим конструктивным решениям. Происшествие в Ronan Point показало, что строительные нормы были недостаточно требовательными к конструкциям и мало учитывали ветровые воздействия. В период с 1975 по 1995 г. активного развития вопроса не было [3].

В период с 2000 по 2010 гг. создаётся ряд документов, в которых есть требования по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [4–6]. Основные пункты: создание неразрезности, увеличение степени статической неопределенности и добавление пластической работы элементов конструкций. Также необходимо работать над исключением ошибок при проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации [7, 8]. Последнее является основным источником аварий. В период с 1981 по 2003 годы выяснено, что 85 % происшествий происходят в эксплуатируемых зданиях и сооружениях [9].

С 2010 года и по сегодняшний день продолжаются исследования по проблеме прогрессирующего обрушения в России и за рубежом. Это показывает, что данная тема содержит много нерешённых вопросов. Основное направление изучения проблемы – расчёт конструкции здания при появлении локального повреждения. Таким повреждением может быть разрушение несущего вертикального элемента, например, колонны. При удалении данного элемента из расчётной схемы проводится анализ вышележащих конструкций на деформации и перераспределение напряжений [10–12]. Для получения более достоверных данных необходимо учитывать геометрическую и физическую нелинейность и проводить динамический расчёт [13].

За рубежом также используют метод исключения несущего элемента в работах, в которых авторы делают выводы о том, что линейная статическая процедура по-прежнему приводила к завышенным пиковым смещениям [14]. Перспективное направление для численного исследования прогрессирующего обрушения – разработка и уточнение линейной статической процедуры, основанной на результатах, полученных с помощью нелинейно-динамического метода. Эти исследования позволяют получать точные значения напряжений и деформаций конструкций с использованием линейного анализа, который займет гораздо меньше времени, чем нелинейное динамическое моделирование [15–17].

Другое направление исследований – защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Главная цель – получить экономически выгодные конструктивные решения, так как одним из основных требований в старых нормах [18] было резервирование прочности для конструкций, что приводило к сильному удорожанию проекта. Данное требование нельзя игнорировать для несущих вертикальных элементов, например, колонн [4–7]. Эти и другие требования перешли в новый документ СП 385.1325800.2018 «Задача зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». Данный свод правил также содержит требования к расчётным комплексам, примеры проведения динамического и кинематического расчётов. Однако ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» имеют противоречия с СП 385.1325800.2018. Например, первый пункт (п. 1.1) этого СП противоречит ГОСТ 27751-2014, так как устанавливает требования к зданиям и сооружениям нормального и повышенного классов КС-2 и КС-3, тогда как в ГОСТ 27751-2014 требования по расчёту на прогрессирующее обрушение предъявляются к сооружениям класса КС-2 с массовым нахождением людей. Данное требование приводит к тому, что все промышленные здания в России не соответствуют этому документу, так как отсутствуют какие-либо ограничения от развития норм прогрессирующего обрушения [19].

Направления исследований, указанные выше, касаются защиты здания и ограничения критической зоны прогрессирующего обрушения. Существует другой вариант изучения данной проблемы, а именно определение критического объёма локального повреждения, при достижении которого

происходит частичное или полное обрушение здания. Например, при расчёте грунтового основания на прогрессирующее разрушение важно учитывать критический размер локального повреждения [20]. Выведена формула критического значения, из которой можно увидеть, от чего зависит зона:

$$L_{Tkp} = \frac{\gamma}{\pi} \cdot \frac{V}{N^2} \cdot C, \quad (1)$$

где N – общая нагрузка; V – объём модели; C – коэффициент жесткости модели в направлении действия нагрузки; коэффициент γ определяется на основании испытаний или на основе теоретического моделирования процесса разрушения с учётом реологических свойств элементов конструктивной системы.

Формула (1) логически правдоподобна и соответствует физической сущности процесса, так как из неё следует, что критический размер L_{Tkp} увеличивается с ростом объёма конструктивной системы и его жёсткости и уменьшается с увеличением общей нагрузки [21].

В данной работе главной целью является определение критической площади повреждения для фундамента каркасного здания, установить наиболее опасное ослабление под колонной, расположенной внутри фундамента, с краю и на углу.

Методика проведения исследования

В данной работе исследуется прогрессирующее разрушение в плите фундамента. Грунт под подошвой фундамента в полном порядке. Отсутствуют какие-либо факторы, влияющие на несущую способность грунта. Деформации происходят из-за внутренних дефектов конструкции. Основная причина – низкое качество бетонирования. Например, недостаточная толщина защитного слоя, плохое уплотнение бетонной смеси, что ведёт к снижению прочности, коррозии арматуры и появлению каверн (пустот). Ослабления появляются случайным образом, поэтому необходимо определить наиболее опасные варианты развития локального разрушения.

В данной работе использован программный комплекс ЛИРА-САПР. Фундамент представляет собой прямоугольную плиту $38,2 \times 19,6$ м толщи-

ной 0,9 м. Класс бетона В25. Плита разбита на прямоугольные конечные элементы (тип 41) размером 0,3 м по оси X и 0,5 м по оси Y. Нагрузки приложены от запроектированного сборного железобетонного здания, которое имеет рамно-связевой каркас. Учитывается собственный вес конструкций, а также полезные, снегоевые и ветровые нагрузки, запроектированные с учётом нормативной документации.

Расчет производился для трех случаев. Анализируется каждый вид нагрузки – вертикальная, горизонтальная и моменты. В функции «нагрузка на фрагмент» берём необходимые данные. Первый случай – нагрузка находится внутри плиты. Второй – нагрузка на краю плиты и последний – на углу. Также определим предельные значения для ряда основных характеристик – деформации по оси z; моменты M_x и M_y ; крутящий момент M_{xy} ; поперечные силы Q_x и Q_y , сопротивление грунта R_z и напряжения по N_x и N_y . По результатам выявлялся самый опасный тип нагрузки и определялось место её приложения.

В процессе исследования локальное разрушение будет представлено в виде конечного элемента с изменённым типом жёсткости. Объекту задавался другой модуль упругости, который стремится к нулю. Около узла с нагрузкой выбирались элементы случайным образом и принимался другой тип жёсткости. Пошагово увеличивали зону и анализировали изменения в других элементах. При достижении предельных значений, которые приводят к разрушению элемента из-за перенапряжения, а не за счёт внутренних дефектов, наступает лавинообразное разрушение. Таким действием можно определить границы критической площади. Данные дефекты с течением времени могут увеличить зону разрушения. Этот процесс в итоге приведёт к выключению данной части фундамента из работы и полному или частичному обрушению здания.

Результаты и обсуждение

Первый случай – нагрузка внутри плиты. В данном варианте в соответствии с рис. 1б прогрессирующее разрушение началось с выключения 10-го элемента. Запредельные значения $Q_x = -13300$ кН

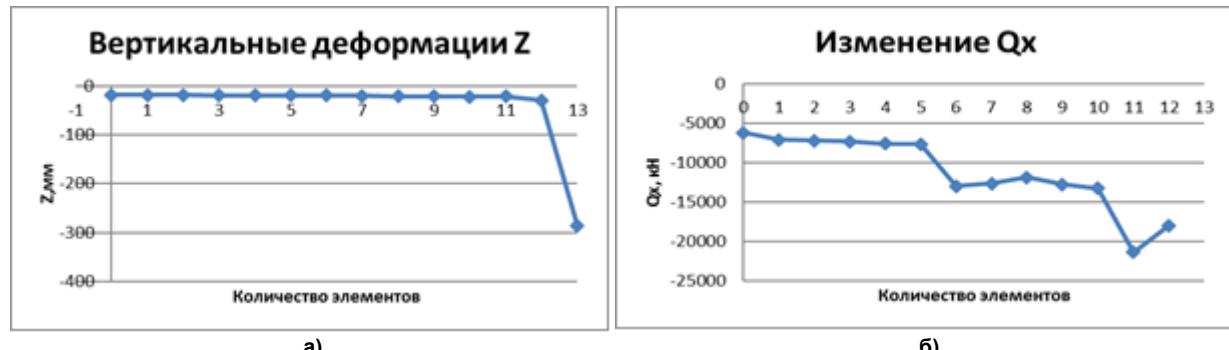


Рис. 1. Результаты расчетов для случая 1: а) перемещение по Z; б) изменения Qx

привели к разрушению внутреннего элемента рядом с приложением нагрузки. Далее разрушились все остальные элементы.

Таким образом, образовалась площадь неработающих элементов 4×5 КЭ. Как показано на рис. 1а, с 12-го элемента появляются значительные вертикальные перемещения от $-29,3$ до -287 мм. По сравнению с первым вариантом этот случай имеет наибольшую максимальную вертикальную деформацию, а также получено запредельное значение $R_z = -730$ кН/м², превосходящее второй вариант $R_z = -678$ кН/м².

Второй случай – нагрузка внутри плиты. В процессе роста ослабления не было достигнуто предельных напряжений по M_x , M_y , Q_x и Q_y . Наблюдался постепенный рост вертикальных деформаций и напряжений отпора грунта, как показано на рис. 2а, б соответственно. При выключении 7-го элемента, который замыкает кольцо с одной стороны, происходит скачок вертикальных перемещений от -27 до $-34,6$ мм и напряжений отпора грунта от -140 до -176 кН/м². Следующий скачок появляется при отключении 13-го элемента, который замыкает кольцо ослабления. Вертикальные деформации от -40 до $-58,9$ мм и напряжения сопротивления грунта изменяются в диапазоне от -204 до -301 кН/м². Дальнейшее выключение элементов ведёт к накоплению перемещений по оси Z и напряжений сопротивления грунта. С отключением 22-го элемента появляются запредельные значения

по вертикальным деформациям -123 мм и сопротивлению грунта -559 кН/м².

Таким образом, в данном варианте ослабления уточнили критическую площадь для крайней колонны. Она стала меньше по сравнению с третьим вариантом второго случая. В предыдущем варианте зона составляла 4×6 элементов, а сейчас стала 4×4 элемента, то есть $1,2\text{ м} \times 1,8\text{ м} = 2,16\text{ м}^2$. Графики изменения некоторых характеристик показаны на рис. 2.

Третий случай – нагрузка на углу плиты. Данной варианте ослабления показал, что выключенные четыре элемента не приводят к запредельным деформациям и напряжениям. Как показано на рис. 3, понадобилось ещё семь элементов, чтобы достичь граничного значения ($Z = -102$ мм). Критическая площадь получилась примерно 3×3 элемента.

Потребовалось выключить семь элементов, чтобы превысить предельные значения перемещений и напряжений у сопротивления грунта. Граница критической зоны не подтвердилась. После нескольких повторов была установлена площадь критической зоны, образование ослаблений в которой приводит к запредельным значениям. Она является самой большой из всех трёх случаев и составляет 12×9 элементов, а именно $3,8\text{ м}$ по оси X на $4,3\text{ м}$ по оси Y .

Далее необходимо было проверить, как прогрессирующее разрушение будет влиять с учётом

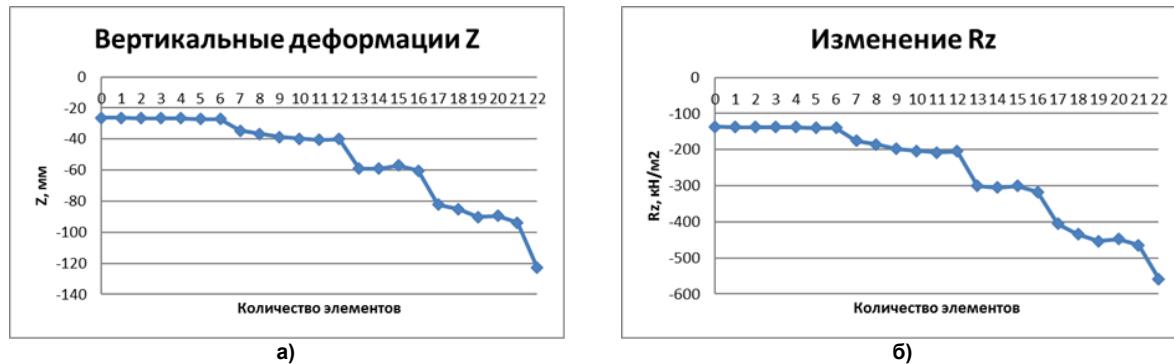


Рис. 2. Результаты расчётов для случая 2: а) перемещение по Z ; б) изменение R_z

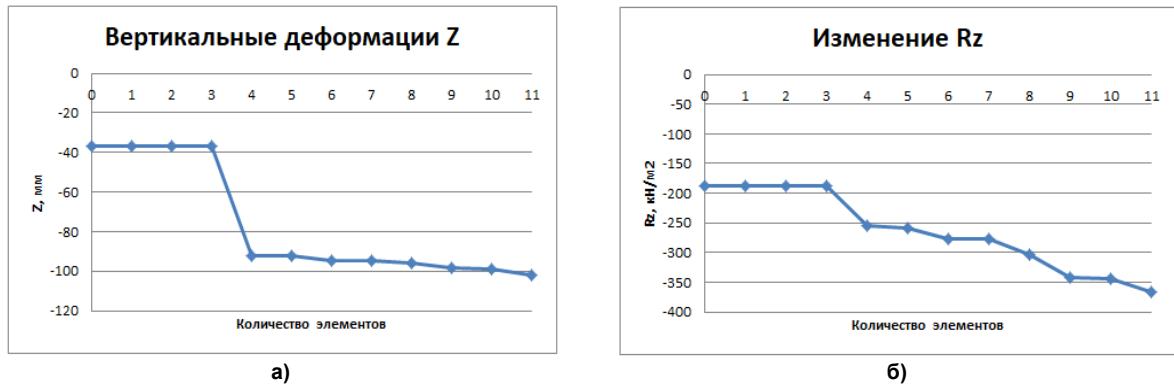


Рис. 3. Результаты расчётов для случая 3: а) перемещения по Z ; б) изменение R_z

самого здания. До этого момента анализировалось поведение фундамента и грунта с просуммированными нагрузками со здания на колонны. Рассмотрим три случая появления ослаблений.

Первый случай – внутренняя колонна. Выключаем четыре элемента под одиночной колонной. Вертикальные перемещения при этом составляют $-7,5$ мм, сопротивление грунта 179 кН/м 2 , что меньше, чем в предыдущих случаях. При увеличении кольца ослабления перемещения уменьшаются.

Второй случай – колонна на краю плиты. Выключаем четыре элемента под одиночной колонной. Вертикальные перемещения составляют $-42,5$ мм, сопротивление грунта 181 кН/м 2 . При увеличении ослабления смещение по оси Z уменьшаются.

Третий случай – колонна на углу плиты. Выключаем четыре элемента под одиночной колонной. Вертикальные перемещения составляют $-40,6$ мм, сопротивление грунта 180 кН/м 2 . При увеличении ослабления перемещения колеблются около -24 мм.

Заключение

Проведено исследование плиты на прогрессирующее разрушение. Рассмотрены три случая приложения нагрузки на плиту. Отдельно проанализирован каждый тип нагрузки. Горизонтальная нагрузка не привела элементы к разрушению

в случае с суммарной нагрузкой на плиту. Самое минимальное значение оказывает момент M_x и M_y .

Выявлены общие черты для всех случаев, а именно то, как растёт ослабление. Выключение четырёх пластин вокруг узла с нагрузкой ведёт к тому, что резко растёт вертикальное перемещение. Однако локальное разрушение может появиться вокруг колонны. Разрушение в виде кольца во всех вариантах и случаях приводит к появлению запредельных значений и дальнейшему прогрессирующему обрушению. При учёте работы каркаса здания запредельных перемещений и напряжений нет, так как каркас рамно-связевой. Здание хорошо воспринимает и распределяет напряжения. Критическая площадь для всех случаев получилась примерно одинаковая – четыре элемента или 1 м 2 .

Таким образом, при учёте каркаса здание хорошо справилось с прогрессирующим разрушением благодаря распределению напряжений по каркасу здания из-за жёстких узлов между ригелем и колонной и наличием диафрагм.

Для предотвращения появления разрушений в несущих конструкциях необходимо применить ряд мер, чтобы снизить риск возникновения прогрессирующего разрушения из-за ошибок в процессе строительства или проектирования. Такими мерами могут быть соблюдение контроля и технологии во время бетонирования фундаментов, поддержка благоприятных условий для эксплуатации конструкций.

Список литературы

1. Сергеев Д.Д. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне: Обзорная информация № 2. М.: ГлавАПУ, 1969. 81 с.
2. Burnett E.F.P. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan point, Canning town. London: Ministry of Housing and Local Government, 1968. 80 p.
3. Burnett E.F.P. The avoidance of progressive collapse: regulatory approaches to the problem. Washington, D.C., Center for building technology institute for applied technology national bureau of standards, 1975. 178 p.
4. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: Москкомархитектура, 2002. 8 с.
5. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. М.: ГУП НИАЦ, 2006. 10 с.
6. СТО 36554501-024-2010. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. М.: ОАО «НИЦ Строительство», 2010. 20 с.
7. Алмазов В.О., Плотников А.И., Растворгувес Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 15–20.
8. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом: монография. М.: Изд-во Ассоциация строит. вузов, 2009. С. 239–248.
9. Айдемиров К.Р. Состояние проблемы прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, классификация задач и подходы к их решению // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2010. № 1. С. 34–47.
10. Андрюсова Н.Б., Ветрова О.А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза // Строительство и реконструкция. 2019. № 81. С. 85–96.
11. Особенности расчета на прогрессирующее обрушение каркаса уникального здания многофункционального комплекса / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, А.К. Кущенко, И.В. Быченко // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. С. 10
12. Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 2 (84). С. 290–299.

13. Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to exterior column removal / Z. Peng, S.L. Orton, J. Liu, Y. Tian // Journal of Structural Engineering. 2017. Vol. 143(9), pp. 04017125.
14. Lew H.S. Best practices guidelines for mitigation of building progressive collapse. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2007. 9 p.
15. Experimental and numerical investigation on the dynamic increase factor of tensile strength in concrete / D. Levi-Hevroni, E.Kochavi , B. Kofman et al. // International Journal of Impact Engineering. 2018. Vol. 11, pp. 93–104.
16. Dmitriev A.N., Lalin V. Comparison of different procedures for progressive collapse analysis of RC flat slab structures under corner column loss scenario // Buildings. 2021. Vol. 11(9), pp. 405.
17. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 210, pp. 110414.
18. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. М.: НИАЦ, 2005. 8 с.
19. Анализ нормативных требований к расчету строительных конструкций на прогрессирующую обрушение / И.И. Ведяков, П.Г. Еремеев, П.Д. Одесский и др. // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 21. С. 15–29.
20. Иващенко Ю.А., Серебренникова Е.Н., Урумбаев А.Ж. О лавинообразном разрушении грунтового основания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22, № 1. С. 63–79.
21. Иващенко Ю.А. Лавинообразное разрушение конструктивных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2012. Т. 14, № 17. С. 26–27.

References

1. Sergeev D.D. Kratkiy obzor otcheta ob avariil 22-etazhnogo zhilogo doma v Londone: Obzornaya informatsiya № 2 [A brief overview of the accident report for a 22-storey residential building in London: Overview Information No. 2]. Moscow, GlavAPU, 1969. 81 p. (in Russ.)
2. Burnett E.F.P. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan point, Canning town. London: Ministry of Housing and Local Government, 1968. 80 p.
3. Burnett E.F.P. The avoidance of progressive collapse: regulatory approaches to the problem. Washington, D.C., Center for building technology institute for applied technology national bureau of standards, 1975. 178 p.
4. Rekomendatsii po zashchite zhilykh karkasnykh zdaniy pri chrezvychaynykh situatsiyakh [Recommendations for the protection of residential frame buildings in emergency situations]. Moscow, Moskomarkhitektura, 2002, 8 p. (in Russ.)
5. Rekomendatsii po zashchite vysotnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Recommendations for the protection of high-rise buildings from progressive collapse]. Moscow, GUP NIATS, 2006, 10 p. (in Russ.)
6. STO 36554501-024-2010. Obespechenie bezopasnosti bolsheproletnykh sooruzheniy ot lavinoobraznogo (progressiruyushchego) obrusheniya pri avariynykh vozdeystviyah [STO 36554501-024-2010. Ensuring the safety of long-span structures against avalanche (progressive) collapse under emergency conditions]. Moscow, OAO «NITS Construction », 2010. 20 p. (in Russ.)
7. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. [Problems of building resistance to progressive destruction]. Vestnik MGSU [Bulletin of the MGSU], 2011, no. 2, pp. 15–20. (in Russ.)
8. Kodysh E.N., Trekin N.N., Nikitin I.K. Proektirovanie mnogoetazhnykh zdaniy s zhelezobetonnym karkasom: monografiya [Design of multi-storey buildings with a reinforced concrete frame: monograph]. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. Pp. 239–248. (in Russ.)
9. Aydemirov K.R. [The state of the problem of progressive destruction of buildings and structures, classification of tasks, and approaches to their solution]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences], 2010, no. 1, pp. 34–47. (in Russ.)
10. Androsova N.B., Vetrova O.A. [Analysis of research and requirements for protecting buildings and structures from progressive collapse in the legislative and regulatory documents of Russia and the European Union]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction], 2019, no. 81, pp. 85–96.
11. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kushchenko A.K., Bychenko I.V. [Features of calculating the progressive collapse of the frame of a unique multifunctional complex building]. Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Journal of Don], 2022, no. 2, pp. 10. (in Russ.)
12. Krasnoshchekov Yu.V. [Protection against progressive collapse of buildings with prefabricated reinforced concrete floors]. Vestnik SibADI [Bulletin of SibADI], 2022, vol. 19, no. 2 (84), pp. 290–299. (in Russ.)
13. Peng Z., Orton S.L., Liu J., Tian Y. Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to exterior column removal. Journal of Structural Engineering, 2017, vol. 143(9), pp. 04017125.

13. Peng Z., Orton S.L., Liu J., Tian Y. Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to exterior column removal. *Journal of Structural Engineering*, 2017, vol. 143(9), pp. 04017125.
14. Lew H.S. Best practices guidelines for mitigation of building progressive collapse. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2007. 9 p.
15. Levi-Hevroni D., Kochavi E., Kofman B., Gruntman S., Sadot O. Experimental and numerical investigation on the dynamic increase factor of tensile strength in concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 11, pp. 93–104.
16. Dmitriev, A.N. Comparison of different procedures for progressive collapse analysis of RC flat slab structures under corner column loss scenario. *Buildings*, 2021, vol. 11(9), pp. 405.
17. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Engineering Structures*, 2020, vol. 210, pp. 110414.
18. *Rekomendatsii po zashchite monolitnykh zhilykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya* [Rekomendatsii po zashchite monolitnykh zhilykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya]. Moscow, NIATS, 2005. 8 p. (in Russ.)
19. Vedyakov I.I., Eremeev P.G., Odeskiy P.D., Popov N.A., Solov'ev D.V. [Analysis of regulatory requirements for calculating building structures for progressive collapse]. *Vestnik NITS "Stroitel'stvo"* [Bulletin of NITS Construction], 2019, no. 21, pp. 15–29. (in Russ.)
20. Ivashenko Yu.A., Serebrennikova E.N., Urumbaev A.Zh. [About the avalanche-like destruction of the ground base]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 63–79. (in Russ.)
21. Ivashenko Yu.A. [Avalanche-like destruction of structural systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2012, vol. 14, no. 17, pp. 26–27. (in Russ.)

Информация об авторах:

Ивашенко Юлий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ivashenkoia@susu.ru

Пастухов Артём Игоревич, студент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ntvffhntvf@mail.ru

Information about the authors:

Yuliya A. Ivashenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ivashenkoia@susu.ru

Artyom I. Pastukhov, student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ntvffhntvf@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.05.2025, принята к публикации 06.06.2025.

The article was submitted 14.05.2025, approved after reviewing 06.06.2025.