

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А. П. Малышкин, А. В. Есипов, М. А. Есипов
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

INCREASING THE RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE FRAMES OF MULTISTOREY BUILDINGS

Aleksandr P. Malyshkin, Andrei V. Esipov, Mixail A. Esipov
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Целью численных исследований являлась разработка метода повышения надежности многоэтажных зданий с монолитными железобетонными каркасами, основанного на анализе суммарной площади возможного разрушения перекрытий вследствие возникновения аварийных ситуаций и отказа отдельных элементов зданий, расположенных в разных местах в плане и по высоте. Для анализа надежности пространственных железобетонных каркасов на основании принципа единичного отказа отдельной несущей конструкции было введено понятие коэффициента площади разрушения, позволяющего оценить влияние отказа несущего ключевого элемента здания на суммарную площадь разрушения перекрытий здания. В пространственных рамных конструкциях многоэтажных зданий с железобетонным каркасом ключевыми элементами конструктивной системы являются колонны, пилоны, ригели, балки, прочие элементы, участвующие в обеспечении общей устойчивости здания. Повышение надежности каркасного здания в целом предполагается путем введения дополнительного коэффициента надежности по живучести, зависящего от коэффициента площади разрушения. Кроме того, предложен алгоритм анализа и отбраковывания неудачных конструктивных систем каркасных зданий из мо-

Abstract. The aim of the numerical research was to develop a method to improve the reliability of multistorey buildings with monolithic reinforced concrete frames. The method was based on the analysis of the total area of possible slab destruction due to emergencies and failure of individual building elements located in different places in the plan and in height. To analyze the reliability of spatial reinforced concrete frames according to the principle of single failure of a separate load-bearing structure, we introduced the concept of failure area coefficient. It allowed us to estimate the failure effect of a load-bearing key element of the building on the total failure area of the building slabs. In spatial frame structures of multistorey buildings with reinforced concrete frame, the key elements of the structural system are columns, pylons, collars, beams and other elements that ensure the overall stability of the building. Increasing the overall reliability of the frame building suggest the introducing an additional reliability coefficient of survivability depending on the failure area factor. In addition, we proposed an algorithm for analyzing and rejection of unsuccessful structural systems of monolithic reinforced concrete frame buildings based on the evaluation of excessively high ratios of building failure area. We analyzed the structural

нолитного железобетона, основанный на оценке излишне высоких коэффициентов площади разрушения здания. На примере двух построенных многоэтажных зданий жилого и общественного назначения с монолитными железобетонными каркасами проведен анализ их конструктивных систем.

Ключевые слова: коэффициент площади разрушения, монолитный железобетон, каркасное здание, надежность здания, безопасность, живучесть, прогрессирующее обрушение

systems on the example of two constructed multistorey residential and public buildings with monolithic reinforced concrete frames.

Key words: failure area coefficient, monolithic reinforced concrete, frame building, building reliability, safety, survivability, progressive collapse

Для цитирования: Малышкин, А. П. Повышение надежности железобетонных каркасов многоэтажных зданий / А. П. Малышкин, А. В. Есипов, М. А. Есипов. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-42-55. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 42–55.

For citation: Malyshkin, A. P., Esipov, A. V., & Esipov, M. A. (2024). Increasing the reliability of reinforced concrete frames of multistorey buildings. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 42-55. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-42-55.

1. Введение

При проектировании многоэтажных зданий с монолитными железобетонными каркасами особое внимание следует уделять надежности конструктивных систем. Физический износ конструкций, повреждения отдельных ее элементов, возникающие в процессе эксплуатации, при различных физических воздействиях, снижают несущую способность зданий. Наиболее важным условием обеспечения безопасности граждан является живучесть конструктивной системы при различных, в том числе непроеekтных, воздействиях. Живучесть – это способность сохранять воз-

можность функционирования системы при наличии повреждений отдельных элементов [1–3]. При проектировании конструктивной системы живучесть может оцениваться как свойство сохранять несущую способность конструкций и работоспособность объекта в целом при возникновении аварийных ситуаций, разрушении одного или нескольких несущих элементов [4–12]. При этом разрушение отдельных элементов может моделироваться путем создания вторичной расчетной схемы с удалением вышедшего из строя элемента.

В соответствии с ГОСТ 27751-2014¹ и СП 296.1325800.2017², к аварийной ситуации вслед-

¹ ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (EN 1990:2002, NEQ. ISO 2394:1998 NEQ) = Reliability for constructions and foundations. General principles : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст в качестве национального стандарта РФ с 1 июля 2015 г. : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан ОАО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736> (дата обращения: 07.10.2023).

² Здания и сооружения. Особые воздействия = Buildings and structures. Accidental actions : СП 296.1325800.2017 : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 3 августа 2017 г. № 1105/пр и введен в действие с 4 февраля 2018 г. : введен впервые : дата введения 2018-02-04 / исполнители – АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко при участии АО МНИИТЭП, ФГБУ «ГГО им. А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 07.10.2023).

ствие отказа несущего элемента здания приводят особые воздействия, подразделяемые на нормируемые (сейсмические или в результате пожара) и аварийные (при взрыве или столкновении с транспортными средствами, аварии оборудования и отказе работы несущего элемента конструкции). Для сохранения живучести здания в соответствии с федеральным законом № 384-ФЗ³ необходимо на стадии проектирования прогнозировать возможные последствия отказов несущих элементов и учитывать различные варианты наиболее опасных расчетных ситуаций. Каждый расчетный сценарий, согласно СП 20.13330.2016⁴, должен соответствовать отдельному сочетанию нагрузок и включать в себя одно из нормируемых (проектных) особых воздействий или один вариант локальных разрушений несущих конструкций для аварийных особых воздействий согласно СП 296.1325800.2017.

В связи с отсутствием требований к отказоустойчивости сооружений оценить и сопоставить живучесть различных конструктивных систем весьма затруднительно, так как для этого необходимо провести анализ большого количества сценариев отказа несущих элементов каждого варианта конструктивной схемы здания, что при ограниченных сроках и ресурсах, отведенных на проектные работы в гражданском строительстве, является неосуществимым.

Непредвиденные разрушения отдельных элементов несущих конструкций способны привести к непригодности здания и сооружения к эксплуатации [1], чего можно было бы избежать при наличии четкого алгоритма создания оптимальной конструктивной системы сооружения,

максимально отвечающего требованиям надежности и живучести, или хотя бы метода оценки и сопоставления надежности и живучести для различных вариантов конструктивных систем.

В этой связи актуальной задачей является создание детерминированного инженерного подхода для анализа живучести многоэтажных зданий с монолитным железобетонным каркасом и выявление наиболее важных ключевых элементов каркаса.

При этом требования к снижению себестоимости строительства и одновременно с этим повышению безопасности и живучести зданий весьма противоречивы. Учащение аварийных ситуаций, связанных с ошибками проектирования, строительства и эксплуатации зданий [13], ставит вопрос о необходимости решения проблемы живучести многоэтажных зданий.

Настоящее исследование направлено на решение проблемы оценки живучести каркасных зданий на стадии проектирования путем создания четкого алгоритма анализа конструктивных систем и применения дополнительных коэффициентов надежности.

2. Материалы и методы

На сегодняшний день метода анализа и оценки каркаса здания на живучесть не существует. Основополагающим может стать принцип единичного отказа отдельной конструкции. В то же время отказ одного несущего элемента не должен повлиять на работоспособность здания в целом.

В конструктивной схеме важность отдельных несущих элементов каркаса различна. На-

³Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (с изменениями на 2 июля 2013 года) : Федеральный закон № 384-ФЗ : принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902192610> (дата обращения: 10.11.2023).

⁴ Нагрузки и воздействия = Loads and actions : СП 20.13330.2016 : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. / исполнители – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 07.03.2023).

пример, при отказе колонны подвала происходит разрушение всех вышележащих этажей в рамках ее грузовой площади, при отказе балки покрытия площадь обрушения будет намного меньше и в рамках одного этажа, следовательно, последствия отказа отдельного конструктивного элемента тоже различны.

Для оценки важности отдельных элементов каркаса здания необходимо выделить в конструктивной системе ключевые элементы аналогично рекомендациям МДС 20-2.2008⁵. В пространственных рамных конструкциях многоэтажных зданий с железобетонным каркасом это колонны, пилоны, ригели, балки, а также прочие элементы, участвующие в обеспечении общей устойчивости здания. Недопустимым будем считать отказ конструктивной системы в целом вследствие отказа отдельных ключевых элементов. При этом обеспечение надежности ключевых элементов конструктивной системы повышает вероятность безотказной работы здания, его безопасность и надежность в целом.

Прогрессирующее обрушение каркасных многоэтажных зданий с железобетонными каркасами в данном подходе учитывать не будем, принимая во внимание тот факт, что здание неустойчиво к прогрессирующему обрушению и к конструктивной системе данные требования не предъявлялись. Согласно большому пласту исследований, наиболее сложной и затратной с точки зрения расхода материалов задачей является обеспечение устойчивости к прогрессирующему обрушению большепролетных зданий [14–25], в то время как для монолитных пространственных каркасов большой сложности в этом нет.

В отечественных нормах реализован метод расчета по предельным состояниям (ПС) с целью недопущения перехода конструкции в предельное состояние в течение всего срока эксплуата-

ции. Система коэффициентов, используемая в методе ПС, гарантирует, что ПС конструкции не наступит при самых неблагоприятных нагрузках, значениях прочностных характеристик материалов и условиях работы конструкции. Коэффициенты надежности, применяемые в расчетах по методу ПС ($\gamma_n, \gamma_f, \gamma_m, \gamma_c$), пришли на замену единому коэффициенту запаса и отвечают всем возможным вариантам конструкций, материалов и условий эксплуатации.

Однако система коэффициентов не учитывает особенность ключевых элементов каркаса, место их расположения и степень важности.

Для оценки влияния отказа несущего ключевого элемента на суммарную площадь обрушения перекрытий здания введем новое понятие коэффициента площади разрушения, оценивающего социальные последствия возможной аварии:

$$K_p = \frac{1}{\left(1 - \frac{A_p}{A_{3\partial}}\right)}, \quad (1)$$

где A_p – возможная суммарная площадь разрушения перекрытий всех этажей здания при отказе одного из ключевых элементов, м²;

$A_{3\partial}$ – суммарная площадь всех перекрытий здания, м².

Коэффициент разрушения зависит от суммарной площади разрушения перекрытий A_p и суммарной площади всех перекрытий здания $A_{3\partial}$. Чем больше A_p , тем выше степень важности при отказе ключевого элемента (рис. 1).

Для анализа конструктивных систем каркасных зданий необходимо определить допустимые граничные значения коэффициента площади разрушения K_p , при которых не потребуются менять расчетную схему сооружения. Согласно графикам зависимости коэффициента площади раз-

⁵ Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях : МДС 20-2.2008 : утверждены приказом ФГУП «НИЦ «Строительство» от 5 мая 2008 г. № 107 : введены впервые / разработаны лабораторией металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко – филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064583> (дата обращения: 07.03.2023).

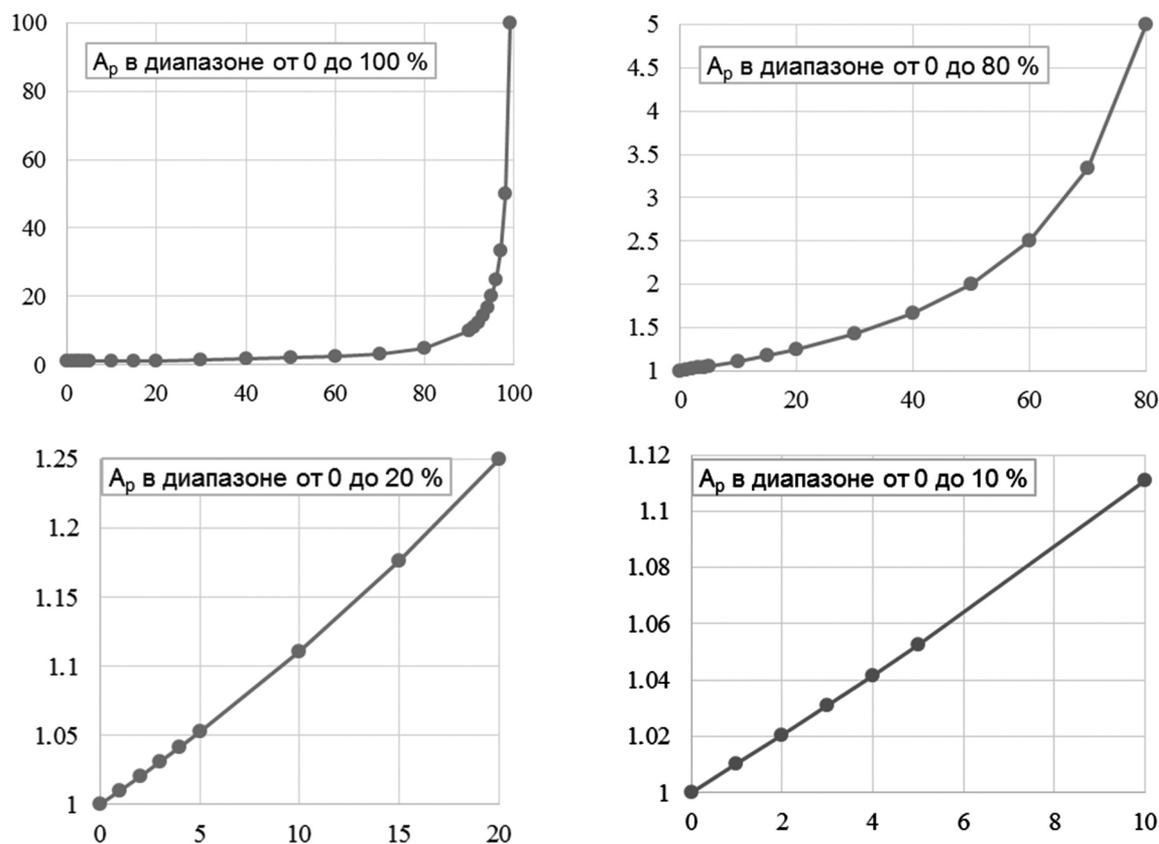


Рис. 1. Зависимость коэффициента разрушения K_p от процента площади разрушения A_p
 Fig. 1. Dependence of failure coefficient K_p on the percent of failure area A_p

рушения K_p от процента площади разрушения перекрытий здания A_p (рис. 1), до 20% от суммарной площади обрушения перекрытий A_p графики имеют практически линейную зависимость. При проценте площади разрушения перекрытий здания A_p более 20% зависимость коэффициента площади разрушения K_p от площади разрушения перекрытий здания A_p становится нелинейной, т. е. возникает нарастающее лавинообразное обрушение конструкций, сходное по своей сути с прогрессирующим обрушением. Поэтому для недопущения лавинообразного обрушения конструкций граничным значением коэффициента площади разрушения будем считать $K_p = 1.25$, соответствующее суммарной площади обрушения перекрытий A_p в размере 20% от суммарной площади всех перекрытий здания $A_{зд}$.

Рассмотрим элементарную ячейку каркасного 9-этажного здания (рис. 2). Площадь всех перекрытий здания составляет 864 м². Суммар-

ная площадь разрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов здания и коэффициенты площади разрушения K_p представлены в таблице 1.

Коэффициенты разрушения K_p для балок равны 1.03 (для Б1) и 1.01 (для Б2).

Разброс значений коэффициента площади разрушения K_p для колонн варьируется в широких пределах от 1.01 до 9, что свидетельствует о различном влиянии на суммарную площадь разрушения перекрытий при возможном отказе отдельной колонны и, как следствие, различных социальных последствиях для находящихся в здании граждан. Разброс значений коэффициента K_p для балок перекрытий, как и следовало ожидать, ввиду близких значений грузовых площадей отличается незначительно.

Таким образом, на этапе проектирования и расчетов необходимо детально анализировать конструктивную систему здания, не допуская ко-

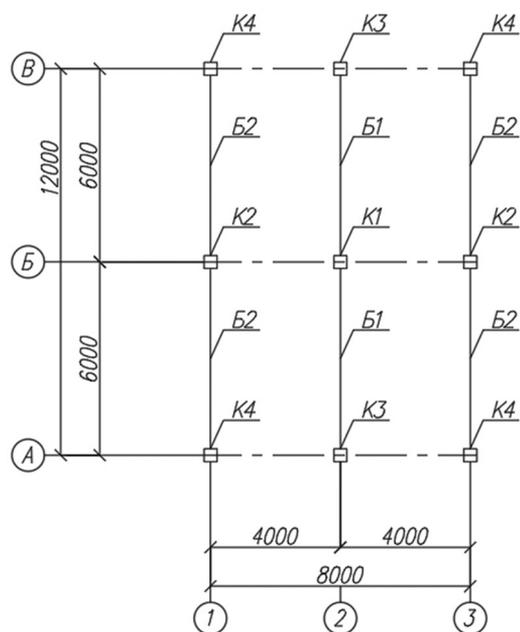


Рис. 2. Схема расположения элементов каркаса
Fig. 2. Scheme of frame elements

Таблица 1/Table 1

Суммарные площади обрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн
Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure

Этаж	Колонны							
	K1		K2		K3		K4	
	A_p, m^2	K_p						
1	864	–	432	2	432	2	216	1.33
2	768	9	384	1.8	384	1.8	192	1.29
3	672	4.5	336	1.64	336	1.64	168	1.24
4	576	3	288	1.5	288	1.5	144	1.2
5	480	2.25	240	1.38	240	1.38	120	1.16
6	384	1.8	192	1.29	192	1.29	96	1.13
7	288	1.5	144	1.2	144	1.2	72	1.09
8	192	1.29	96	1.13	96	1.13	48	1.06
9	96	1.13	48	1.06	48	1.06	24	1.03

эффицента площади разрушения $K_p > 1.25$, и при необходимости закладывать в ключевые элементы каркаса с высокими значениями коэффициента площади разрушения K_p дополнительный запас по несущей способности.

Дополнительный коэффициент надежности по живучести конструкции γ_l для ключевых элементов каркаса предлагается вводить при значениях коэффициента площади разрушения $K_p > 1.1$, соответствующего суммарной площади обрушения перекрытий A_p в размере 9 % от суммарной площади всех перекрытий здания $A_{зд}$. Значения коэффициента надежности по живучести конструкции γ_l при $K_p > 1.1$ зависят от уровня ответственности здания и класса сооружения (таблица 2).

Таблица 2/Table 2

Значение коэффициента надежности по живучести γ_l
Value of reliability coefficient of survivability γ_l

Уровень ответственности здания	Класс сооружения	Коэффициент надежности по живучести γ_l
Повышенный	КС-3	1.2
Нормальный	КС-2	1.1
Пониженный	КС-1	1.0

При коэффициенте площади разрушения $K_p > 1.25$ необходимо выполнить корректировку конструктивной схемы сооружения для исключения больших суммарных площадей разрушения перекрытий при отказе отдельного ключевого элемента конструкции.

3. Результаты и обсуждение

Согласно предложенному принципу, были проанализированы конструктивные системы двух спроектированных и возведенных зданий жилого и общественного назначения, определены коэффициенты площади разрушения K_p для колонн всех этажей.

Анализ конструктивной системы жилого здания

Здание точечной компоновки 14-этажное с максимальными размерами по осям крайних колонн 26.1 × 26.1 м. Общая устойчивость и неизменяемость каркаса, а также восприятие горизонтальных нагрузок обеспечиваются диафрагмами лестнично-лифтового блока. Колонны квадратные сечением 0.5 × 0.5 м и 0.6 × 0.6 м. Плиты пе-

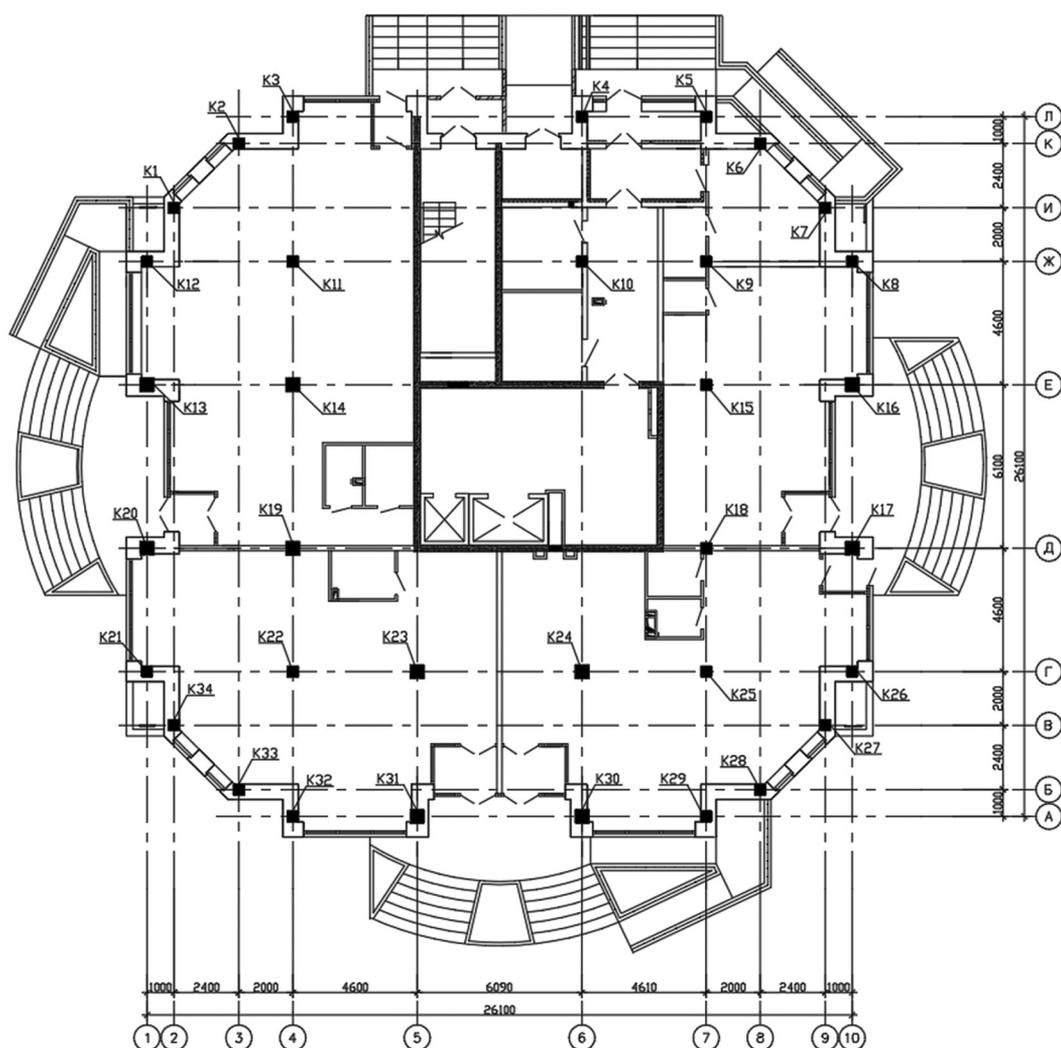


Рис. 3. Схема расположения элементов каркаса жилого здания
 Fig. 3. Scheme of frame elements in a residential building

рекрытия толщиной 180 мм. Бетон вертикальных несущих конструкций В30, плит перекрытий В25. Арматура элементов каркаса А400. Конструктивная схема здания и обозначение ключевых элементов – колонн – приведены на рис. 3.

Площадь всех перекрытий эксплуатируемых этажей здания составляет 7 560 м². Суммарная площадь разрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов здания и коэффициенты площади разрушения K_p были рассчитаны по предложенной формуле (1), результаты представлены в таблице 3. Колоннам с коэффициентами разрушения, значения

которых находятся в диапазоне $1.1 < K_p \leq 1.25$, необходимо уделить особое внимание и при проведении расчета армирования присвоить дополнительный коэффициент надежности по живучести конструкции $\gamma_l = 1.1$. Коэффициент разрушения $K_p > 1.25$ выявлен у четырех колонн первого этажа, имеющих ключевое значение (К14, К19, К23 и К24).

Анализ несущих конструкций здания, согласно полученным в ходе проектирования коэффициентам разрушения, позволил сделать вывод о необходимости корректировки конструктивной схемы здания.

Таблица 3/Table 3

Суммарные площади разрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн жилого здания
 Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure in a residential building

Этаж	Колонны							
	К1, К2, К6, К7, К27, К28, К33, К34		К3, К5, К8, К12, К21, К26, К29, К32		К4		К9, К11, К22, К25	
	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p
1	280	1.04	630	1.09	574	1.08	1274	1.20
2	260	1.04	585	1.08	533	1.08	1183	1.19
3	240	1.03	540	1.08	492	1.07	1092	1.17
4	220	1.03	495	1.07	451	1.06	1001	1.15
5	200	1.03	450	1.06	410	1.06	910	1.14
6	180	1.02	405	1.06	369	1.05	819	1.12
7	160	1.02	360	1.05	328	1.05	728	1.11
8	140	1.02	315	1.04	287	1.04	637	1.09
9	120	1.02	270	1.04	246	1.03	546	1.08
10	100	1.01	225	1.03	205	1.03	455	1.06
11	80	1.01	180	1.02	164	1.02	364	1.05
14	20	1.00	45	1.01	41	1.01	91	1.01
Этаж	Колонны							
	К10		К13, К16, К17, К20, К30, К31		К14, К19, К23, К24		К15, К18	
	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p
1	1064	1.16	812	1.12	1498	1.25	1232	1.19
2	988	1.15	754	1.11	1391	1.23	1144	1.18
3	912	1.14	696	1.10	1284	1.20	1056	1.16
4	836	1.12	638	1.09	1177	1.18	968	1.15
5	760	1.11	580	1.08	1070	1.16	880	1.13
6	684	1.10	522	1.07	963	1.15	792	1.12
7	608	1.09	464	1.07	856	1.13	704	1.10
8	532	1.08	406	1.06	749	1.11	616	1.09
9	456	1.06	348	1.05	642	1.09	528	1.08
10	380	1.05	290	1.04	535	1.08	440	1.06
11	304	1.04	232	1.03	428	1.06	352	1.05
14	76	1.01	58	1.01	107	1.01	88	1.01

Анализ конструктивной системы общественного здания

Здание прямоугольное в плане 12-этажное с максимальными размерами по осям крайних колонн 51.2 × 38.4 м. Общая устойчивость и неиз-

меняемость каркаса, а также восприятие горизонтальных нагрузок обеспечиваются отдельными диафрагмами жесткости. Колонны квадратного сечения 0.4 × 0.4 м, 0.5 × 0.5 м и 0.6 × 0.6 м в зависимости от места расположения в плане и

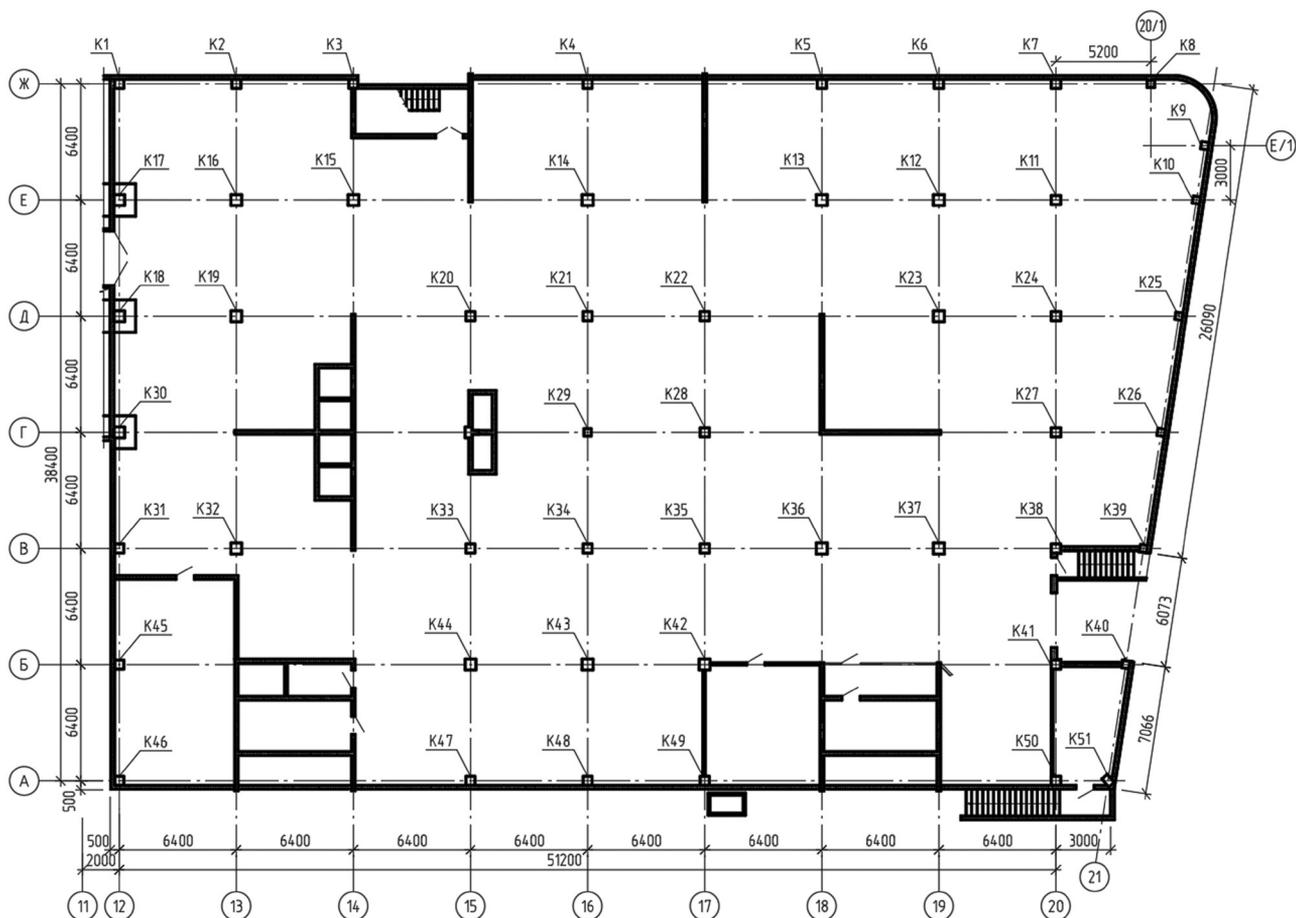


Рис. 4. Схема расположения элементов каркаса общественного здания
 Fig. 4. Scheme of frame elements in a public building

по высоте здания. Шаг колонн 6.4 × 6.4 м. Плиты перекрытия толщиной 200 мм с капителями толщиной 400 мм. Бетон вертикальных несущих конструкций и плит перекрытий В30. Арматура элементов каркаса А500. Конструктивная схема здания с обозначением ключевых элементов – колонн – приведена на рис. 4.

Площадь всех перекрытий эксплуатируемых этажей здания составляет 26 280 м². Суммарная площадь обрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов общественного здания и коэффициенты разрушения K_p были рассчитаны по предложенной формуле (1), результаты приведены в таблице 4.

Колонны со значениями коэффициента площади разрушения $K_p > 1.11$ не были выявлены, следо-

вательно, присвоение дополнительного коэффициента надежности по живучести конструкции γ для отдельных элементов каркаса не требуется.

4. Заключение

С целью повышения надежности, безопасности и живучести многоэтажных зданий с железобетонными каркасами и снижения вероятности возникновения критических отказов отдельных элементов конструкций вследствие аварийных воздействий было предложено оценивать влияние отказа несущих ключевых элементов каркаса на суммарную площадь обрушения перекрытий.

Предложенный метод повышения надежности позволяет разграничить важность отдельных

Таблица 4/ Table 4
 Суммарные площади разрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн общественного здания
 Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure in a public building

Этаж	Колонны																				
	К1, К3		К2, К4, К6, К17, К18, К30, К31, К45-К49		К7, К26		К8, К9		К10		К11		К12-К14, К16, К22, К23, К28, К35-К37, К42-К44		К15,		К19, К27, К32		К20, К21, К33, К34		
	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2
1	492	1.02	984	1.04	888	1.03	660	1.03	1176	1.05	2160	1.09	1968	1.08	1716	1.07	1860	1.08	1920	1.08	
2	451	1.02	902	1.04	814	1.03	605	1.02	1078	1.04	1980	1.08	1804	1.07	1573	1.06	1705	1.07	1760	1.07	
3	410	1.02	820	1.03	740	1.03	550	1.02	980	1.04	1800	1.07	1640	1.07	1430	1.06	1550	1.06	1600	1.06	
4	369	1.01	738	1.03	666	1.03	495	1.02	882	1.03	1620	1.07	1476	1.06	1287	1.05	1395	1.06	1440	1.06	
5	328	1.01	656	1.03	592	1.02	440	1.02	784	1.03	1440	1.06	1312	1.05	1144	1.05	1240	1.05	1280	1.05	
6	287	1.01	574	1.02	518	1.02	385	1.01	686	1.03	1260	1.05	1148	1.05	1001	1.04	1085	1.04	1120	1.04	
7	246	1.01	492	1.02	444	1.02	330	1.01	588	1.02	1080	1.04	984	1.04	858	1.03	930	1.04	960	1.04	
8	205	1.01	410	1.02	370	1.01	275	1.01	490	1.02	900	1.04	820	1.03	715	1.03	775	1.03	800	1.03	
9	164	1.01	328	1.01	296	1.01	220	1.01	392	1.02	720	1.03	656	1.03	572	1.02	620	1.02	640	1.02	
10	123	1.00	246	1.01	222	1.01	165	1.01	294	1.01	540	1.02	492	1.02	429	1.02	465	1.02	480	1.02	
11	82	1.00	164	1.01	148	1.01	110	1.00	196	1.01	360	1.01	328	1.01	286	1.01	310	1.01	320	1.01	
12	41	1.00	82	1.00	74	1.00	55	1.00	98	1.00	180	1.01	164	1.01	143	1.01	155	1.01	160	1.01	
Этаж	Колонны																				
	К24		К25		К26		К29		К38		К39		К40		К41		К50		К51		
	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	
1	2016	1.08	1032	1.04	888	1.03	1896	1.08	1320	1.05	408	1.02	264	1.01	1248	1.05	768	1.03	288	1.01	
2	1848	1.08	946	1.04	814	1.03	1738	1.07	1210	1.05	374	1.01	242	1.01	1144	1.05	704	1.03	264	1.01	
3	1680	1.07	860	1.03	740	1.03	1580	1.06	1100	1.04	340	1.01	220	1.01	1040	1.04	640	1.02	240	1.01	
4	1512	1.06	774	1.03	666	1.03	1422	1.06	990	1.04	306	1.01	198	1.01	936	1.04	576	1.02	216	1.01	
5	1344	1.05	688	1.03	592	1.02	1264	1.05	880	1.03	272	1.01	176	1.01	832	1.03	512	1.02	192	1.01	
6	1176	1.05	602	1.02	518	1.02	1106	1.04	770	1.03	238	1.01	154	1.01	728	1.03	448	1.02	168	1.01	
7	1008	1.04	516	1.02	444	1.02	948	1.04	660	1.03	204	1.01	132	1.01	624	1.02	384	1.01	144	1.01	
8	840	1.03	430	1.02	370	1.01	790	1.03	550	1.02	170	1.01	110	1.00	520	1.02	320	1.01	120	1.00	
9	672	1.03	344	1.01	296	1.01	632	1.02	440	1.02	136	1.01	88	1.00	416	1.02	256	1.01	96	1.00	
10	504	1.02	258	1.01	222	1.01	474	1.02	330	1.01	102	1.00	66	1.00	312	1.01	192	1.01	72	1.00	
11	336	1.01	172	1.01	148	1.01	316	1.01	220	1.01	68	1.00	44	1.00	208	1.01	128	1.00	48	1.00	
12	168	1.01	86	1.00	74	1.00	158	1.01	110	1.00	34	1.00	22	1.00	104	1.00	64	1.00	24	1.00	

конструктивных элементов здания и для наиболее неблагоприятных из них назначить дополнительный запас надежности по живучести γ . Также данный подход позволяет оценить неудачные конструктивные системы и сделать вывод о необходимости их корректировки.

Библиографический список

1. Кудишин, Ю. И. К вопросу о живучести строительных конструкций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 2 (217). – С. 36–43.
2. Кудишин, Ю. И. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот. – Текст : электронный // [cdn.scipeople.ru](http://cdn.scipeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf) : сайт. – URL: http://cdn.scipeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf (дата обращения: 12.03.2024).
3. Кудишин, Ю. И. Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварийных ситуаций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 59–71.
4. Травуш, В. И. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений / В. И. Травуш, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 3. – С. 4–11.
5. Травуш, В. И. Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем / В. И. Травуш, Н. В. Федорова. – Текст : непосредственный // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 1 (45). – С. 21–28.
6. Ключева, Н. В. К построению критериев живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем / Н. В. Ключева, Н. Б. Андросова. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 1 (222). – С. 29–34.
7. Ключева, Н. В. К оценке живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапных запроектных воздействиях / Н. В. Ключева, О. А. Ветрова. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 11. – С. 56–57.
8. Тамразян, А. Г. Ресурс живучести – основной критерий проектных решений высотных зданий / А. Г. Тамразян. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
9. Колчунов, В. И. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова. – Текст : непосредственный // Вестник НИЦ «Строительство». – 2018. – № 1 (16). – С. 115–119.
10. Дьяков, И. М. Предпосылки и некоторые аспекты применения теории живучести к оценке работы подпорных стен на запредельные нагрузки / И. М. Дьяков. – Текст : непосредственный // Строительство и технологическая безопасность : Сборник научных трудов. – Симферополь : НАПКС, 2011. – Вып. 39. – С. 29–34.
11. Дьяков, И. М. Оценка живучести свайных удерживающих конструкций / И. М. Дьяков. – Текст : непосредственный // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сборник научных трудов. – Днепропетровск : Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2013. – Вып. 69. – С. 169–174.
12. Назаров, Ю. П. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / Ю. П. Назаров, А. С. Городецкий, В. Н. Симбиркин. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4 (225). – С. 5–9.
13. Айдемиров, К. Р. (2010). Состояние проблемы прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, классификация задач и подходы к их решению / К. Р. Айдемиров. – Текст : непосредственный // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2010. – № 1. – 13 с.
14. Бондаренко, В. М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 28–31.
15. Теличенко, В. И. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара – базовый элемент системы комплексной безопасности / В. И. Теличенко, В. М. Ройтман. – Текст : электронный // Наука и безопасность : электронный журнал. – URL: <https://www.pamag.ru/prensa/mtsuz-cs> (дата обращения: 10.02.2024).
16. Ройтман, В. М. Прогрессирующее обрушение высотных зданий: инженерные аспекты событий 11 сентября 2001 года / В. М. Ройтман. – Текст : электронный // Предотвращение аварий зданий и сооружений. –

URL: <https://prevdis.ru/progressiruyushhee-obrushenie-vysotnyh-zdanij-inzhenernye-aspekty-sobytij-11-sentyabrya-2001-goda/> (дата обращения: 10.02.2024).

17. Алмазов, В. О. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов / В. О. Алмазов, К. Као Зуй. – Москва : Издательство АСВ, 2013. – 128 с. – Текст : непосредственный.
18. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures / Y. Bao, S. K. Kunnath, S. El-Tawil, H. S. Lew. – Текст : электронный // *Journal of Structural Engineering*. – 2008. – Vol. 134. – No. 7. – P. 1079–1091.
19. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. NIST Technical Note 1720 / H. S. Lew, Y. Bao, F. Sadek [et al.]. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1720.pdf> (дата обращения: 01.02.2024). – Текст : электронный.
20. Mosalam, Kh. M. Modeling progressive collapse in reinforced concrete framed structures / Kh. M. Mosalam. – Текст : электронный // *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. – 2008. – URL: <https://invenio.itam.cas.cz/record/11064?ln=en> (дата обращения: 01.02.2024).
21. Improving collapse-resistance performance of steel frame with openings in beam web / B. Meng, J. Hao, W. Zhong [et al.]. – DOI 10.1016/j.istruc.2020.08.009. – Текст : непосредственный // *Structures*. – 2020. – No. 27 (8). – P. 2156–2169.
22. Малышкин, А. П. Опыт проектирования большепролетного покрытия с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. П. Малышкин, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2014. – № 38 (57). – С. 40–48.
23. Алексеева, А. А. Анализ строительных норм для проектирования большепролетных зданий с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. А. Алексеева, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2017 года / отв. ред. А. Н. Халин*. – Т. I. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 48–52.
24. Волощук, Д. А. Нормативные требования при проектировании высотных зданий с учетом соблюдения требований прогрессирующего обрушения / Д. А. Волощук, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2017 года / отв. ред. А. Н. Халин*. – Т. I. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 78–81.
25. Есипов, А. В. Расчет прогонов с учетом недопущения прогрессирующего обрушения шатра покрытия здания со стальным каркасом / А. В. Есипов, А. А. Алексеева. – Текст : непосредственный // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2018. – № 4 (39). – С. 89–93.

References

1. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2008). K voprosu o zhivuchesti stroitel'nykh konstruksiy. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, (2(217)), pp. 36-43. (In Russian).
2. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2009). Metodika rascheta stroitel'nykh konstruksiy na edinichnyu zhivuchest'. (In Russian). Available at: http://cdn.scipeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf (accessed 12.03.2024).
3. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2009). Building structure survivability. *Metal Constructions*, 15(1), pp. 59-71. (In Russian).
4. Travush, V. I., Kolchunov, V. I., & Klyueva, N. V. (2015). Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*, (3), pp. 4-11. (In Russian).
5. Travush, V. I., & Fedorova, N. V. (2017). Survivability parameter calculation for framed structural systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, (1), pp. 6-14. (In Russian).
6. Klyueva, N. V., & Androsova, N. B. (2009). K postroeniyu kriteriev zhivuchesti korrozionno povrezhdaemykh zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, (1(222)), pp. 29-34. (In Russian).
7. Klyueva, N. V., & Vetrova, O. A. (2006). K otsenke zhivuchesti zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevnykh konstruktivnykh sistem pri vnezapnykh zaproektnykh vozdeystviyakh. *Industrial and Civil Engineering*, (11), pp. 56-57. (In Russian).

8. Tamrazyan, A. G. (2010). Resurs zhivuchesti – osnovnoy kriteriy proektnykh resheniy vysotnykh zdaniy. *Housing Construction*, (1), pp. 15-18. (In Russian).
9. Kolchunov, V., & Fedorova, N. (2018). Current problems of reinforced concrete structural systems survivability at emergency impacts. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*, (1(16)), pp. 115-119. (In Russian).
10. D'yakov, I. M. (2011). Predposylki i nekotorye aspekty primeneniya teorii zhivuchesti k otsenke raboty podpornykh sten na zapredel'nye nagruzki. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost': Sbornik nauchnykh trudov. Simferopol'*, NAPKS Publ., 39, pp. 29-34. (In Russian).
11. D'yakov, I. M. (2013). Otsenka zhivuchesti svaynykh uderzhivayushchikh konstruktsiy. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sbornik nauchnykh trudov. Dnepropetrovsk, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture Publ.*, 69, pp. 169-174. (In Russian).
12. Nazarov, Y. P., Gorodetsky, A. S., & Simbirkin, V. N. (2009). About a problem of survivability support of building structures subjected to emergency actions, (4(225)), pp. 5-9. (In Russian).
13. Aydemirov, K. R. (2010). Sostoyanie problemy progressiruyushchego razrusheniya zdaniy i sooruzheniy, klassifikatsiya zadach i podkhody k ikh resheniyu. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki*, (1), 13 p. (In Russian).
14. Bondarenko, V. M., & Kolchunov, V. I. (2013). The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors. *Industrial and Civil Engineering*, (2), pp. 28-31. (In Russian).
15. Telichenko, V. I., & Roytman, V. I. (2012). Obespechenie stoykosti zdaniy i sooruzheniy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiem pozhara – bazovyy element sistemy kompleksnoy bezopasnosti. *Nauka i bezopasnost'*. (In Russian). Available at: <https://www.pamag.ru/prensa/mtsuz-cs> (accessed 10.02.2024).
16. Roytman, V. M. (2014). Progressiruyushchee obrushenie vysotnykh zdaniy: inzhenernye aspekty sobytij 11 sentyabrya 2001 goda. *Predotvrashchenie avariya zdaniy i sooruzheniy*. (In Russian). Available at: <https://prevdis.ru/progressiruyushchee-obrushenie-vysotnykh-zdaniy-inzhenernye-aspekty-sobytij-11-sentyabrya-2001-goda/> (accessed 10.02.2024).
17. Almazov, V. O., & Kao Zuy, K. (2013). *Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov*. Moscow, ASV Publ., 128 p. (In Russian).
18. Bao, Y., Kunnath, S. K., El-Tawil, S., & Lew, H. S. (2008). Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), pp. 1079-1091. (In English).
19. Lew, H. S., Bao, Y., Sadek, F. & Main, J. A. (2011). An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. *NIST Technical Note 1720*. (In English).
20. Mosalam, K. M. (2008). Modeling progressive collapse in reinforced concrete framed structures. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. (In English). Available at: <https://invenio.itam.cas.cz/record/11064?ln=en> (accessed 01.02.2024).
21. Meng, B., Hao, J., Zhong, W., Tan, Z., & Duan, S. (2020). Improving collapse-resistance performance of steel frame with openings in beam web. *Structures*, (27), pp. 2156-2169. (In English).
22. Malyshkin, A. P., & Esipov, A. V. (2014). Experience of design of wide-span covering taking into account prevention of progressive collapse. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, (38(57)), pp. 40-48. (In Russian).
23. Alekseeva, A. A., & Esipov, A. V. (2018). Analiz stroitel'nykh norm dlya proektirovaniya bol'sheproletnykh zdaniy s uchetom nedopushcheniya progressiruyushchego obrusheniya. *Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov*, December, 22. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 1, pp. 48-52. (In Russian).
24. Voloshchuk, D. A., & Esipov, A. V. (2018). Normativnye trebovaniya pri proektirovanii vysotnykh zdaniy s uchetom soblyudeniya trebovaniy progressiruyushchego obrusheniya. *Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov*, December, 22. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 1, pp. 78-81. (In Russian).
25. Esipov, A. V., & Alekseeva, A. A. (2018). Raschet prognozov s uchetom nedopushcheniya progressiruyushchego obrusheniya shatra pokrytiya zdaniya so stal'nym karkasom. *Akademicheskij Vestnik URALNIIPROEKT RAASN*, (4(39)), pp. 89-93. (In Russian).

Сведения об авторах

Малышкин Александр Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Есипов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Есипов Михаил Андреевич, бакалавр, Тюменский индустриальный университет, e-mail: yacorl.mail@gmail.com

Information about the authors

Aleksandr P. Malyshkin, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Andrei V. Esipov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Mixail A. Esipov, Bachelor, Industrial University of Tyumen, e-mail: yacorl.mail@gmail.com