

Научная статья

П.А. КАЙДАС¹¹ Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Российская Федерация**ЖИВУЧЕСТЬ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Аннотация. Рассматривается задача оценки живучести сборно-монолитных железобетонных рам и рамных каркасов зданий при особых аварийных воздействиях. Живучесть определяется как способность системы перераспределять нагрузку между несущими элементами после выключения из конструктивной системы одного из элементов без наступления ее геометрической изменяемости. Методика базируется на двухуровневой расчётной схеме: сначала рассматривается пространственная рама всего здания в целом, затем — фрагмент каркаса в зоне возможного локального разрушения. Расчёт включает определение напряжённо-деформированного состояния при эксплуатационных нагрузках, оценку динамических догрузок после удаления элемента и вычисление параметра живучести конструктивной системы. Используются трёхлинейные диаграммы деформирования «момент — кривизна» и «сдвигающая сила — угол сдвига», учитывающие образование нормальных и сдвиговых трещин, а также податливость шва между сборной и монолитной частями ригелей. Установлено, что до образования трещин сдвига между сборной и монолитной частями ригелей рам сечение ригеля работает как монолитное, а после образования трещин от сдвига — как составная конструкция. Полученные результаты могут быть использованы при оценке живучести сборно-монолитных рамных и рамно-связевых железобетонных конструктивных систем при особых и аварийных воздействиях.

Ключевые слова: сборно-монолитные конструкции, особые воздействия, трещинообразование, перемещения, живучесть.

Для цитирования: Кайдас П.А. Живучесть сборно-монолитных железобетонных рам при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2026. №3 (125). С. 60-70. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-125-3-60-70. EDN: HWOXXO

Research Article

P.A. KAYDAS¹¹ National Researcher Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russian Federation**ROBUSTNESS OF PRECAST MONOLITHIC CONCRETE FRAMES INDER SPECIAL IMPACTS**

Abstract. This paper examines the problem of assessing the survivability of precast-monolithic reinforced concrete frames and frame structures in buildings under special accident loads. Survivability is defined as the system's ability to redistribute the load between load-bearing elements after the failure of one of the elements in the structural system without causing any change in its geometry. The methodology is based on a two-level calculation scheme: first, the spatial frame of the entire building is considered as a whole, then a section of the frame in the zone of possible local failure. The calculation involves determining the stress-strain state under service loads, assessing dynamic post-loadings following the removal of an element, and calculating the structural system's resilience parameter. Three-line deformation diagrams—'moment-curvature' and 'shear force-shear angle'—are used, taking into account the formation of flexural and shift cracks, as well as the ductility of the joint between the precast and monolithic layers of the beams. The influence of the spacing of transverse reinforcement in the bearing zone of the beam was investigated. It has been established that, prior to the formation of shift cracks between the precast and monolithic layers of the beams, the beam cross-section behaves as a monolithic structure; once shift crack have formed, it behaves as a composite structure.

© Кайдас П.А., 2026



Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons NonCommercial license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

The results obtained can be used to assess the resilience of precast-monolithic frame and frame-braced reinforced concrete structural systems under special and emergency loads.

Keywords: precast-monolithic structures, special impacts, cracking, displacements, survivability.

For citation: Kaydas P.A. Robostness of precast monolithic concrete frames indier special impacts. Building and Reconstruction. 2026; 3(125): 60-70. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-125-3-60-70. EDN: HWOXXO

1. Введение

Ежегодно в мире увеличивается риск возникновения особых воздействий природного, техногенного и террористического характера [1-5]. В связи с этим, проблема повышения живучести зданий и сооружений и их защита от прогрессирующих обрушений является одной из важнейших в обеспечении механической безопасности зданий и сооружений. Об этом свидетельствует также и непрерывный рост за последние годы научных публикаций по обозначенной тематике как в России [6-11], так и за рубежом [12-16]. Однако, ряд направлений исследований в рассматриваемой области остаются открытыми. Одним из таких направлений является исследование живучести железобетонных конструктивных систем каркасов многоэтажных зданий со сборно-монолитными конструктивными элементами, при внезапной структурной перестройке конструктивной системы, вызванной особым воздействием. В частности, практически отсутствуют исследования, в которых при расчетах таких конструктивных систем в запредельных состояниях, сборно-монолитные конструктивные элементы рассматриваются, с расчетной точки зрения, как составные с учетом продольного сдвига между сборной и монолитной частями элементов.

Значительная часть исследований по этому направлению [17-19] проведена с использованием численных методов и программных комплексов и, следовательно, полученным в них результатам присущи и известные для этих методов недостатки, главные из которых - невозможность качественного анализа исследуемых параметров, и отсутствие инженерной обзримости получаемых решений. При этом точность результатов, как правило, зависит от уровня квалификации расчетчика. Практически отсутствуют экспериментальные исследования железобетонных конструктивных систем каркасов зданий, или их фрагментов со сборно-монолитными элементами, а изветные исследования проведены для конструктивных систем, применяемых в зарубежной практике [20,21].

Целью настоящего исследования являлось построение методики и алгоритма численно-аналитического расчета живучести физически и конструктивно нелинейных железобетонных сборно-монолитных рам с различными параметрами жесткости контактного шва между сборной и монолитной частями элементов при особом воздействии.

2. Модели и методы

Живучесть сборно-монолитной железобетонной рамы будем определять как способность к перераспределению нагрузки между ее несущими элементами при внезапном удалении из работы конструктивной системы одного из элементов без наступления ее геометрической изменяемости [22,23]. Для количественной оценки живучести будем использовать параметр живучести λ , который определяется как коэффициент при заданной статической нагрузке, при увеличении которого в элементах рамной системы достигаются предельно допустимые деформации или перемещения элементов в каком-либо из рассматриваемых наиболее напряженных сечений и в этом сечении образуется пластический шарнир. Этот параметр связан с уровнем внешнего нагружения конструкции до приложения особого воздействия и увеличением этого параметра после особого воздействия - при выключении из работы рамы одного из конструктивных элементов. Соответственно, этот параметр связан со степенью статической неопределимости рамы и, при образовании определенного количества пластических шарниров, конструкция рамы становится геометрически изменяемой.

В соответствии с общими положениями метода расчета приведенного в [24] в настоящей статье представлена практическая методика и алгоритм расчета параметра живучести железобетонных рамных каркасов зданий со сборно-монолитными элементами. Алгоритм расчета построен по двухуровневой расчетной схеме. На первом уровне рассматривается железобетонный сборно-монолитный многоэтажный каркас здания в виде пространственной рамы (рисунок 1а). На втором уровне рассматривается фрагмент каркаса, примыкающего к удаляемому несущему элементу каркаса, т.е. так называемая зона возможного разрушения (рисунок 1б). Каркас здания нагружен заданной эксплуатационной нагрузкой в соответствии с действующими нормами и особым воздействием, предусмотренным требованиями ГОСТ 27751-2014 и СП 385.1325800.2018.

Методика расчета включает четыре основных блока:

- блок 1. Формирование исходных данных и первичной расчетной схемы;
- блок 2. Напряженно-деформированное состояние первичной расчетной схемы;
- блок 3. Определение параметров динамических догрузок в рамной системе при вторичной расчетной схеме;
- блок 4. Расчет параметра живучести железобетонной сборно-монолитной рамной системы при особом воздействии.

Определение усилий в рамной системе от действия заданных постоянных и временных проектных нагрузок с использованием первичной расчетной схемы, на основе эквивалентных жесткостей сборно-монолитных изгибаемых элементов производится без учета сдвиговых деформаций, на основе принятых геометрических размеров, материалов и армирования, используя при этом классические методы строительной механики, или конечно-элементным расчетом в верифицированном программном комплексе.

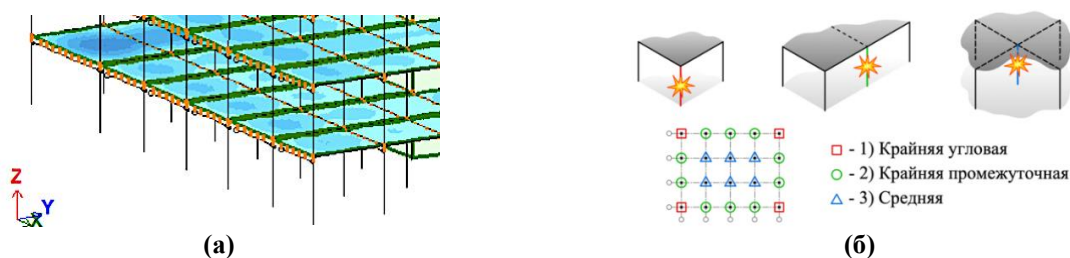


Рисунок 1 – Расчетная схема каркаса здания (а) и варианты расчетной схемы подконструкции в зоне возможного разрушения пространственной рамной системы (б)

При определении динамических догрузок в элементах рамной системы рассматривается ограниченная зона – зона возможного локального разрушения, размеры которой определяется действующими нормами [25]. Зона возможного локального разрушения плоской или пространственной рамной системы ограничивается пролетом ригеля или ригелей, примыкающих к удаляемой колонне в случае её выключения. Диаграммы общего вида статико-динамического деформирования сечения составного элемента «изгибающий момент – кривизна» ($M - \kappa$) и «сдвигающая сила – угол сдвига» – ($T - \gamma$) приняты в соответствии с рисунком 2. В частном случае, для практического расчета, диаграммы могут быть приняты трехлинейными.

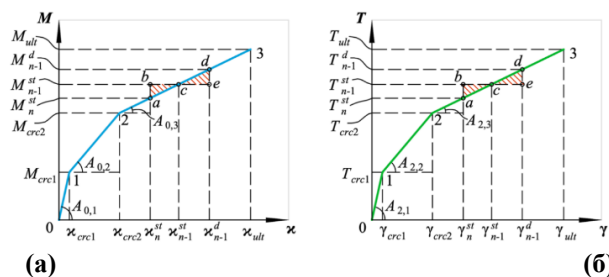


Рисунок 2 – Общий вид диаграммы «момент – кривизна» (а) и «сдвигающая сила – угол сдвига» (б) для составного железобетонного элемента при двухэтапном статико-динамическом нагружении

Первый линейный участок (0–1) обеих диаграмм охватывает деформирование сечения сборно-монолитного ригеля рамы при статическом нагружении от начала нагружения до образования в нем нормальных трещин. Второй участок (1–2) описывает процесс деформирования сечения сборно-монолитного ригеля после образования в нем трещин нормальных к продольной оси элемента. Третий участок (2–3) описывает состояние ригеля после образования продольных трещин от сдвига в шве контакта между сборным и монолитным бетонами и нормальных трещин, также при статическом нагружении, и динамического догружения.

На втором этапе расчета из конструкции рамы в зоне возможного локального разрушения выделяется подконструкция ригеля, примыкающего к удаляемой при особом воздействии колонне. Эта подконструкция моделируется шарнирно-стержневой моделью, где места предполагаемого выключения связей заменяются сложными шарнирами и, соответственно, неизвестными угловыми M_i ($i = 1, 2, \dots, k$), и линейными Z_i ($i = k+1, k+2, \dots, n$) связями (рисунок 3).

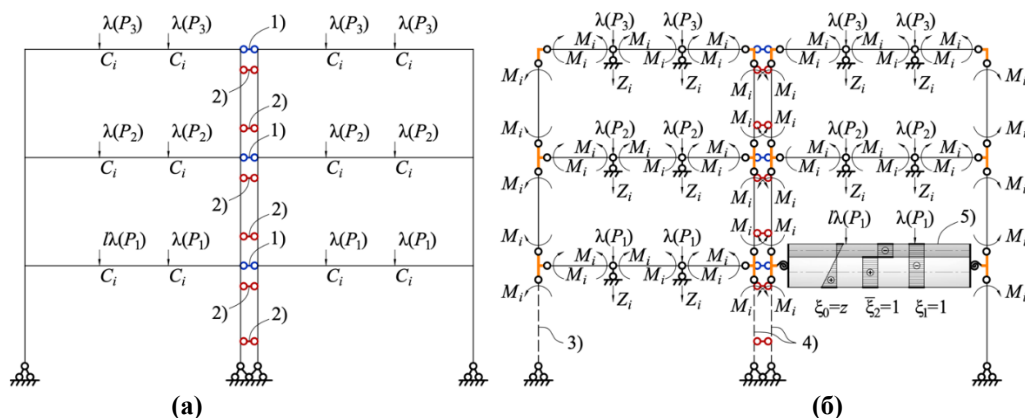


Рисунок 3 – Заданная (а) и основная (б) системы смешанного метода при вычислении параметра живучести λ :

- 1) – соединение панелей-рам монолитным слоем бетона, 2) – соединение панелей-рам закладными деталями, 3) – 1-й сценарий удаления колонны, 4) – 2-й сценарий удаления колонны, 5) – подконструкция ригеля со схемой единичных перемещений

Далее формируется исходная система канонических уравнений в матричной форме в варианте [26], строятся единичные эпюры моментов, определяются коэффициенты канонических уравнений и выполняется решение системы метода перемещений:

$$\begin{cases} A \cdot M + B \cdot Z + \Delta_q + \delta_p \cdot \lambda = 0 \\ C \cdot M + 0 + R_q + r_p \cdot \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Определяется минимальное значение параметрической нагрузки – $\lambda_m = (1, 2, \dots, n)$ при которой после особого воздействия - выключения из работы элемента достигается особое предельное состояние в наиболее нагруженных сечениях ригеля C_i :

$$\lambda_m = \min \left(\frac{M_{i,ult}^d \pm |M_{iq}^d|}{m_{ip}^d} \right), (i = 1, 2, \dots, k). \quad (2)$$

При выключении из работы сечения, в котором достигаются критерии особого предельного состояния по деформациям бетона и арматуры (СП 385.1325800.2018), степень статической неопределимости рамы уменьшается на единицу и, соответственно, преобразуется матрица уравнений смешанного метода.

После повторного преобразования системы определяющих уравнений (исходной будет уже та, которая была получена после предыдущего этапа) на втором и последующих шагах получаем приращение параметрической нагрузки:

$$\lambda_{mi} = \lambda_{m,i-1} + \Delta_{m,i-1}. \quad (3)$$

На основе критерия (2) производится проверка образования пластических шарниров в рассматриваемом сборно-монолитном сечении. За критерий живучести, исследуемой конструктивной рамной системы, в зоне возможного локального разрушения принимается такое значение параметра λ_m , ($m=1, 2, \dots, n$) при котором рамная система с составными элементами переходит в систему, изменяющую свою статическую неопределимость.

График параметрической нагрузки в зависимости от взаимного сдвига в сечении сборно-монолитного ригеля к оценке живучести рамного каркаса представлен на рисунке 4 и включает в себя следующие участки: 1) – упругая работа конструкции, в пределах закона Гука; 2) – участок работы конструкции, после образования нормальных трещин, который по физической сущности является упруго-пластическим; 3) – участок особого воздействия, который характеризуется пластической работой, поскольку параметрическая нагрузка не увеличивается, а деформации, в следствии перераспределения внутренних усилий и изменения расчетной схемы, растут; 4) – работа конструкции после образования сдвиговых трещин; 5) – работа конструкции после перераспределения усилий в следствии особого воздействия; 6) – работа конструкции с последовательным образованием пластических шарниров в следствии накопленных деформаций и напряжений, этот участок может повторяться некоторое количество раз, до тех пор, пока в рамной конструкции не образуется такое количество пластических шарниров, при котором начнется геометрическая изменяемость конструктивной системы.

Следует отметить, что участки на рисунке 4 могут меняться местами, в зависимости от различных конструктивных и нагрузочных параметров. Например, сдвиговая трещиностойкость сечения может быть превышена в ходе динамического особого воздействия, тогда участок 5 войдет в участок 3 (и останется пластичным), а участки 4 и 6 таким образом будут объединены.

Приведенный график характеризует сопротивление рамной системы с составными элементами и, соответственно, позволяет определять параметраматрическую нагрузку и, соответственно, параметр живучести. Если же защита от прогрессирующего обрушения при особом воздействии не обеспечена, то график будет иметь 2 основных участка: 1) – упругая (упруго-пластическая) работа конструкции до особого воздействия, характеризуется постепенным увеличением сдвиговых деформаций в зависимости от параметрической нагрузки; 3) – пластический участок работы конструкции, в рамках которого будут происходить все остальные процессы, будь-то образование трещин различных типов, или последовательного образования пластических шарниров, до истощения статической неопределимости системы, и, затем, её геометрической изменяемости.

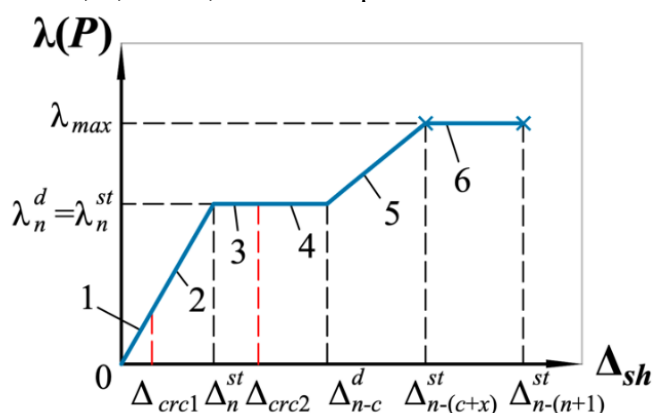


Рисунок 4 – Общий вид графика параметрической нагрузки $\lambda(P)$ в зависимости от величины взаимного сдвига бетонов Δ_{sh} ;

n – степень статической неопределимости системы, c – число удаляемых связей при особом воздействии, x – приращение степени статической определимости за счет образования i -го пластического шарнира

Количественная оценка живучести выполняется с использованием параметра живучести λ , который рассматривается как множитель к заданной параметрической нагрузке. Значением этого параметра определяют превышения предельно допустимых деформации или перемещений элементов в каком-либо из рассматриваемых сложнапряженных сечений конструктивных элементов рамной системы. Этот параметр связан с уровнем внешнего нагружения конструкции статической нагрузкой на первом этапе нагружения рамы до приложения к ней особого воздействия. Увеличение параметра λ ведет к выключению из работы рамы сечений, в которых превышены предельные деформации бетона или арматуры и, соответственно, этот параметр определяет степени статической неопределимости рамной конструкции и как следствие - исчерпание ее живучести.

Этот график строится для наиболее напряженного сечения исследуемой подконструкции в пределах зоны локального разрушения, при особом воздействии, определяется деформационными критериями (Δ_{sh}, f), поскольку силовые критерии в сечениях реальных конструкциях не работают: разрушение одного, или нескольких сечений подконструкции в статически неопределимой рамной системе не ведет к локальным и тем более к прогрессирующему обрушению.

Согласно разработанной методики составлен алгоритм для определения параметрической нагрузки железобетонной рамы с составными изгибаемыми элементами. Блок-схема этого алгоритма итерационного расчета приведена на рисунке 5.

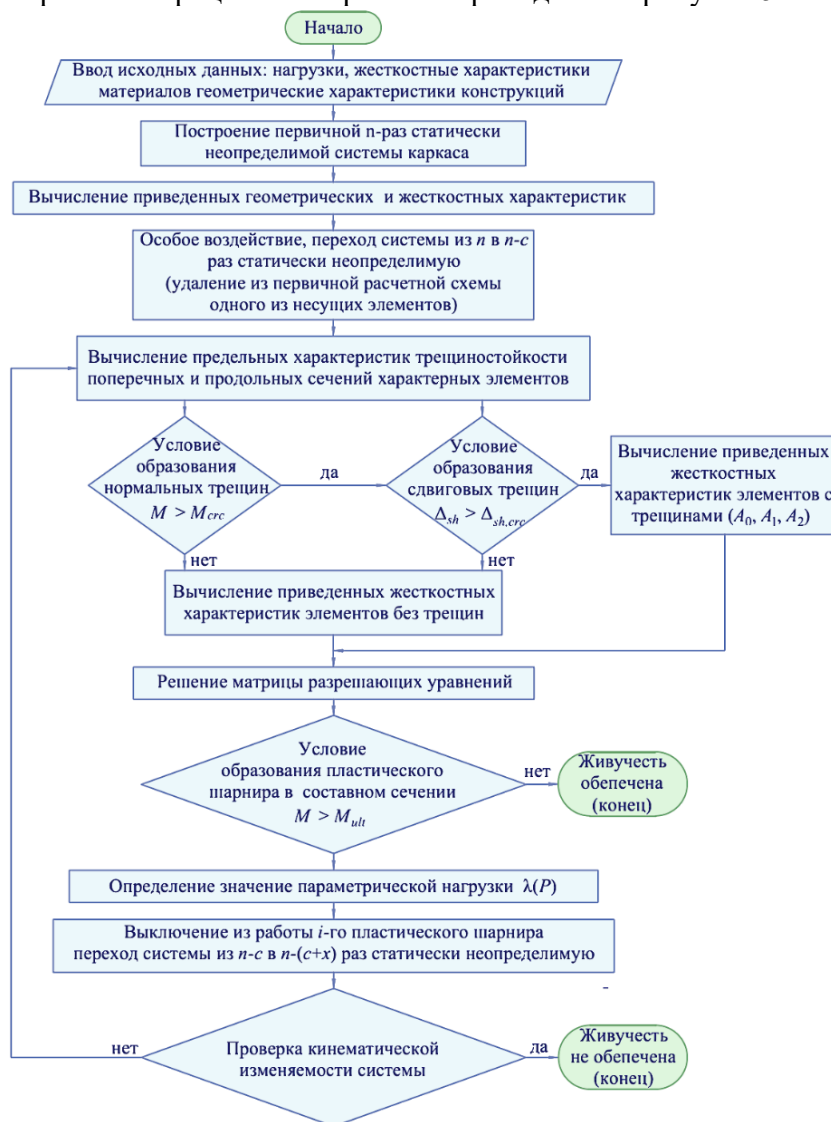


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма итерационного расчета живучести железобетонной сборно-монолитной рамы



а) – эксперимент; б) – численно-аналитический расчет; 1), 2), ... – порядковые номера пластических шарниров

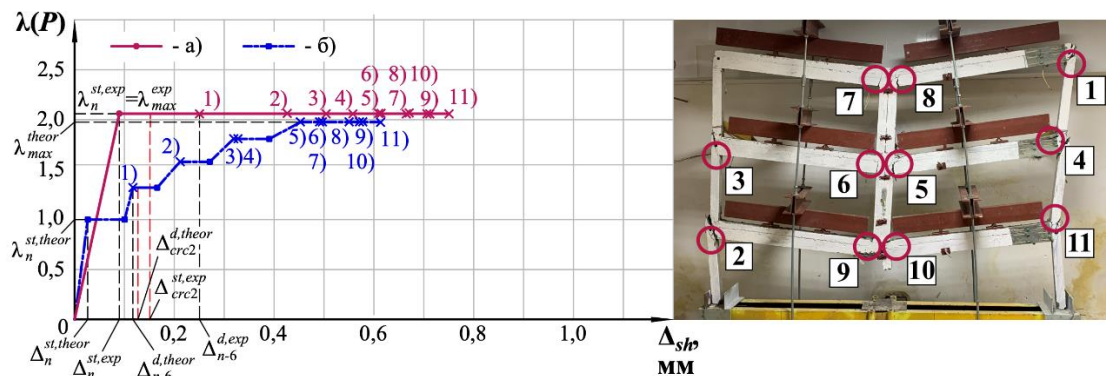


Рисунок 8 – График зависимости деформации сдвига Δ_{sh} в поперечном сечении наиболее напряженного ригеля зоны локального разрушения от параметрической нагрузки $\lambda(P)$ для сценария внезапного выключения из работы средней стойки:

а) – эксперимент; б) – численно-аналитический расчет; 1), 2), ... – порядковые номера пластических шарниров

Анализ этих рисунков позволяет отметить следующее. Согласно экспериментальным данным, особое воздействие в виде внезапного выключения из работы как крайней, так и средней стойки панелей-рам сборно-монолитных рам привело к последовательному образованию в рамной системе пластических шарниров и затем к их геометрической изменяемости конструкции рамы. Сдвиговые деформации (Δ_{sh}) при сценарии 1 превысили сдвиговые деформации полученные при сценарии 2 на 19%. Количество пластических шарниров до начала геометрической изменяемости рамной конструкции при сценарии 1 было 8, а при сценарии 2 – 11 шт. Эти различия в результатах были обусловлены различием в степени статической неопределимости расчетных схем зон локального разрушения для сценариев 1 и 2.

Также можно отметить, что при всех рассмотренных вариантах особого воздействия, в наиболее напряженных сечениях сборно-монолитного ригеля рамы образовывались сдвиговые трещины, связанные с превышением сдвигающими усилиями предела прочности контактного шва на сдвиг, и нарушения континуальности связей в нём. Эти трещины оказывают значимое влияние на относительный параметр живучести железобетонной рамной конструкции.

4. Заключение

1. Построена методика численно-аналитического расчета физически и конструктивно нелинейных железобетонных сборно-монолитных рам для оценки параметра их живучести при особом воздействии, вызванном удалением из конструкции одного из элементов. Методика предусматривает использование двухуровневой расчетной схемы. На первом уровне рассматривается рамная конструктивная система в целом. На втором уровне рассматривается фрагмент конструкции, примыкающий к удаляемой колонне рамы. Методика позволяет учитывать деформации сдвига, нормальные трещины и трещины от сдвига между сборной и монолитной частями ригелей рамы.

2. Разработан алгоритм для определения параметрической нагрузки и относительного параметра живучести сборно-монолитной рамной конструктивной системы при особом воздействии позволяющий проводить анализ образования в конструкции трещин различных типов, пластических шарниров в наиболее напряженных сечениях до исчерпания статической неопределимости системы, и, затем, до её геометрической изменяемости.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кодыш, Э. Н. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения / Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин, Д. А. Чесноков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 6. – С. 8-13.
2. Determination of the Criteria of Deformation in a Special Limiting State / N. N. Trekin, E. N. Kodysh, S. D. Shmakov [et al.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17, No. 1. – P. 108-116. – DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116.
3. Mechanical safety of reinforced concrete structures at all stages of the life cycle / I. A. Terekhov, N. N. Trekin, E. N. Kodysh, S. D. Shmakov // E3S Web of Conferences : XXVI International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2023), Tashkent, 26–28 апреля 2023 года. Vol. 410. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. – P. 02012. – DOI 10.1051/e3sconf/202341002012.
4. Колчунов, В. И. Экспозиция живучести в решении задачи защиты зданий от прогрессирующего обрушения / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова, С. Ю. Савин // Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В.М. Бондаренко и Г.Л. Осипова : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В.М. Бондаренко и Материалы Международной научной конференции, посвященной памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, Москва, 01–03 июля 2025 года. – Москва: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2025. – С. 14-18.
5. Савин, С. Ю. Живучесть и техническое состояние железобетонных конструкций каркаса здания в результате особого воздействия / С. Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 4(120). – С. 91-102. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-91-102.
6. V.I. Travush, N.V. Fedorova. Survivability Parameter Calculation for Framed Structural Systems // Russian journal of building construction and architecture. – 2017. – Vol. 33. – № 1. – P. 6–14.
7. Kabantsev, O.V. Deformation and Power characteristics Monolithic Reinforced Concrete Bearing Systems in the Mode of Progressive Collapse / O.V. Kabantsev, B. Mitrovic. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 251. – P. 02047.
8. N.V. Fedorova, N.T. Vu. Deformation Criteria for Reinforced Concrete Frames under Accidental Actions // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – Вып. 1 (109). – № 10902.
9. В.О. Алмазов, А.И. Плотинов, Б.С. Расторгуев. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2-1. – P. 16–20.
10. O.V. Kabantsev, M.G. Kovalev. Failure Mechanisms and Parameters of Elastoplastic Deformations of Anchorage in a Damaged Concrete Base under Seismic Loading // Buildings. – 2022. – Vol. 12, № 1.
11. Alekseytsev, A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. - 2021. - Vol. 103. - № 10306.
12. F. Kiakojouri, V. De Biagi, B. Chiaia, M. Sheidaii. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Eng Struct. - 2020. - Vol. 206. - P. 110061.
13. O.A. Mohamed, M.S. Keshawarz. Modeling for Progressive Collapse Mitigation Using Nonlinear Static Analysis Procedures // Proceedings of the Ninth International Conference on Computational Structures Technology. 2009.
14. Alanani, M. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method / M. Alanani, M. Ehab, H. Salem. // Case Studies in Construction Materials. Elsevier Ltd., 2020. Vol. 13. P. e00457.
15. Bažant, Z.P. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions / Z.P. Bažant, M. Verdure. // J Eng Mech. - 2007. - Vol. 133. - № 3. - P. 308–319.
16. J.M. Adam, M. Buitrago, E. Bertolesi, J. Sagaseta, J.J. Moragues. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Eng Struct. 2020. Vol. 210. 110414.
17. С. Ю. Савин, Н. В. Федорова, С. Г. Емельянов. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн // Жилищное строительство. 2018. № 12. С. 3-7.
18. А. Е. Белкин, И. Д. Бирюков. Определение сдвиговой жесткости заполнителя трехслойного стержня по известным значениям прогибов или частот собственных колебаний // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2025. № 2(779). С. 12-22.
19. Gangfeng Y, Youzhen F, Xueyu X. Seismic performance of various precast concrete beam-to-column joints: A review and test data-based investigation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2026. Vol. 207. 110328.
20. Jiongfeng Liang, Haitao Yao, Caisen Wang, Youzhen Fang, Li Xin. Experimental study on shear behavior of prefabricated partially encased concrete beam // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 116. 114670.
21. Shun-Tao Li, Wang-Xi Zhang, Yi-Bo Zhou, Xiang-Dong Cai, Yong-Qiang Liang, Wei-Jian Yi. Seismic behavior of precast concrete corner joints under bidirectional cyclic loading: Experimental and numerical study // Engineering Structures. 2026. Vol. 361. 122823.
22. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И.Колчунов, Н.В.Клюева, Н.Б.Андросова, А.С. Бухтиярова. – М.: АСВ, 2014.
23. Колчунов, В. И. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова // Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 1(16). С. 115-119. – EDN YNSGER.

24. Kolchunov V. I. Progressive Collapse Behavior of a Precast Reinforced Concrete Frame System with Layered Beams / V. I. Kolchunov, N. V. Fedorova, S. Y. Savin, P. A. Kaydas // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 6. – P. 1776. – DOI 10.3390/buildings14061776. – EDN YCLTNL.
25. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / – М. : Стандартинформ, Россия. 2020. –124 С.
26. Милейковский И. Е. Неординарный смешанный метод расчета рамных систем с элементами сплошного и составного сечения / И. Е. Милейковский, В. И. Колчунов // *Изв. вузов. Строительство*. – 1995. – №7–8. –С. 32–37.
27. П. А. Кореньков, Н. В. Федорова, П. А. Кайдас. Методика экспериментального определения параметров живучести сборно-монолитного железобетонного каркаса // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 5(103). С. 45-56.

REFERENCES

1. Kodysh, E. N. Zashchita mnogoetazhnyh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya / E. N. Ko-dysh, N. N. Trekin, D. A. Chesnokov // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2016. – № 6. – S. 8-13.
2. Determination of the Criteria of Deformation in a Special Limiting State / N. N. Trekin, E. N. Kodysh, S. D. Shmakov [et al.] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Vol. 17, No. 1. – P. 108-116. – DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116.
3. Mechanical safety of reinforced concrete structures at all stages of the life cycle / I. A. Terekhov, N. N. Trekin, E. N. Kodysh, S. D. Shmakov // *E3S Web of Conferences : XXVI International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2023)*, Tashkent, 26–28 апреля 2023 года. Vol. 410. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. – P. 02012. – DOI 10.1051/e3sconf/202341002012.
4. Kolchunov, V. I. Ekspoziciya zhivuchesti v reshenii zadachi zashchity zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya / V. I. Kolchunov, N. V. Fedorova, S. YU. Savin // *Sbornik trudov, posvyashchennyh pamyati akademikov RAASN V.M. Bondarenko i G.L. Osipova : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAASN V.M. Bondarenko i Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoy konferencii, posvyashchennoj pamyati akademika RAASN G.L. Osipova*, Moskva, 01–03 iyulya 2025 goda. – Moskva: Rossijskaya akademiya arhitektury i stroitel'nyh nauk, 2025. – S. 14-18.
5. Suwin, S. YU. ZHivuchest' i tekhnicheskoe sostoyanie zhelezobetonnyh konstrukcij karkasa zdanija v rezul'tate osobogo vozdejstviya / S. YU. Savin // *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. – 2025. – № 4(120). – S. 91-102. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-91-102.
6. V.I. Travush, N.V. Fedorova. Survivability Parameter Calculation for Framed Structural Systems // *Russian journal of building construction and architecture*. – 2017. – Vol. 33. – № 1. – P. 6–14.
7. O.V. Kabantsev, B. Mitrovic. Deformation and Power characteristics Monolithic Reinforced Concrete Bearing Systems in the Mode of Progressive Collapse // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 251. – P. 02047.
8. Fedorova, N.V. Deformation Criteria for Reinforced Concrete Frames under Accidental Actions / N.V. Fedorova, N.T. Vu. // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – Вып. 1 (109). – № 10902.
9. Almazov, V.O. Problemy soprotivleniya zdaniy progressiruyushchemu razrusheniyu / V.O. Almazov, A.I. Plotnikov, B.S. Rastorguev. // *Vestnik MGSU*. – 2011. – № 2-1. – P. 16–20.
10. Kabantsev, O.V. Failure Mechanisms and Parameters of Elastoplastic Deformations of Anchorage in a Damaged Concrete Base under Seismic Loading / O.V. Kabantsev, M.G. Kovalev. // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12, № 1.
11. Alekseytsev, A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. - 2021. - Vol. 103. - № 10306.
12. Kiakojouri, F. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects / F. Kiakojouri, V. De Biagi, B. Chiaia, M. Sheidaii. // *Eng Struct*. - 2020. - Vol. 206. - P. 110061.
13. O.A. Mohamed, M.S. Keshawar. Modeling for Progressive Collapse Mitigation Using Nonlinear Static Analysis Procedures // *Proceedings of the Ninth International Conference on Computational Structures Technology*. 2009.
14. M. Alanani, M. Ehab, H. Salem. Progressive collapse assessment of precast prestressed reinforced concrete beams using applied element method // *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier Ltd., 2020. Vol. 13. P. e00457.
15. Z.P. Bažant, M. Verdure. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions // *J Eng Mech*. - 2007. - Vol. 133. - № 3. - P. 308–319.
16. J.M. Adam, M. Buitrago, E. Bertolesi, J. Sagaseta, J.J. Moragues. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // *Eng Struct*. 2020. Vol. 210. 110414.
17. S. Yu. Savin, N. V. Fedorova, S. G. Emel'yanov. Analiz zhivuchesti sborno-monolitnyh karkasov mnogoetazhnyh zdaniy zhelezobetonnyh panel'no-ramnyh elementov pri avarijnyh vozdejstviyah, vyzvannyh poterej ustojchivosti odnoj iz kolonn // *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2018. № 12. P. 3-7.
18. A. E. Belkin, I. D. Biryukov. Opredelenie sdvigovoy zhestkosti zapolnitelya trekhslonnoy sterzhnya po izvestnym znacheniyam progibov ili chastot sobstvennyh kolebanij // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyeniye*. 2025. № 2(779). P. 12-22. – EDN ZJKAZI.
19. Gangfeng Y, Youzhen F, Xueyu X. Seismic performance of various precast concrete beam-to-column joints: A review and test data-based investigation // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2026. Vol. 207. 110328.

20. Jiongfeng Liang, Haitao Yao, Caisen Wang, Youzhen Fang, Li Xin. Experimental study on shear behavior of prefabricated partially encased concrete beam // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 116. 114670.
21. Shun-Tao Li, Wang-Xi Zhang, Yi-Bo Zhou, Xiang-Dong Cai, Yong-Qiang Liang, Wei-Jian Yi. Seismic behavior of precast concrete corner joints under bidirectional cyclic loading: Experimental and numerical study // *Engineering Structures*. 2026. Vol. 361. 122823.
22. Kolchunov V.I. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdejstviyah / V.I.Kolchunov, N.V.Klyueva, N.B.Androsova, A.S. Buhtiyarova. – M.: ASV, 2014.
23. Kolchunov, V. I. Nekotorye problemy zhivuchesti zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem pri avariynnykh vozdejstviyah / V. I. Kolchunov, N. V. Fedorova // *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2018. № 1(16). S. 115-119. – EDN YNSGER.Kolchunov, V. I. et al. Progressive Collapse Behavior of a Precast Reinforced Concrete Frame System with Layered Beams // *Buildings*. 2024. Vol. 14(6), no. 1776.
24. Kolchunov V. I. Progressive Collapse Behavior of a Precast Reinforced Concrete Frame System with Layered Beams / V. I. Kolchunov, N. V. Fedorova, S. Y. Savin, P. A. Kaydas // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 6. – P. 1776. – DOI 10.3390/buildings14061776. – EDN YCLTNL.
25. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya / – M. : Standartinform, Rossiya. 2020. –124 S.
26. Milejkovskij I. E. Neordinarnyj smeshannyj metod rascheta ramnykh sistem s elementami sploshnogo i sostavnogo secheniya / I. E. Milejkovskij, V. I. Kolchunov // *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*. – 1995. –№7–8. –S. 32–37.
27. P. A. Koren'kov, N. V. Fedorova, P. A. Kajdas. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya parametrov zhivuchesti sborno-monolitnogo zhelezobetonного karkasa // *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. № 5(103). S. 45-56.

Сведения об авторах:

Кайдас Павел Анатольевич, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация. Scopus ID: 58287300800, SPIN-код: 1897-2042, <https://orcid.org/0000-0002-7169-2652> . E-mail: pavelkds@yandex.ru.

About the authors:

Pavel A. Kaydas, Postgraduate Student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Senior Lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russian Federation. Scopus ID: 58287300800, SPIN-код: 1897-2042, <https://orcid.org/0000-0002-7169-2652> . E-mail: pavelkds@yandex.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор утвердил окончательный вариант статьи.

The author declares no conflict of interest.

The author has approved the final version.

Статья поступила в редакцию 23.05.2026

Одобрена после рецензирования 02.06.2026

Принята к публикации 14.06.2026

The article was submitted 23.05.2026

Approved after reviewing 02.06.2026

Accepted for publication 14.06.2026