

П.А. КОРЕНЬКОВ¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹, П.А. КАЙДАС¹¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИВУЧЕСТИ СБОРНО-МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА

Аннотация. Приведена методика проведения экспериментальных и численных исследований железобетонных рам-фрагментов сборно-монолитной железобетонной конструктивной системы многоэтажных зданий. Целью проведенных исследований являлось определение характера изменения параметров статико-динамического деформирования и силового сопротивления предлагаемой конструктивной системы как на стадии эксплуатации, так и при аварийном воздействии, вызванным выключением из работы одного из элементов - угловой колонны первого этажа. Для повышения сопротивляемости исследуемой системы к локальному или прогрессирующему обрушению предложены новые конструктивные решения ригелей сборно-монолитной рамы, позволяющие повысить ее сопротивляемость при внезапном изменении силовых потоков в рассматриваемой конструктивной системе. Предложены аналитические зависимости для определения параметров межсредовой зоны контакта в сборно-монолитной конструкции ригеля. Решение рассматриваемых задач выполнено с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР с учетом диаграмм работы материала, учитывающих статико-динамический характер нагружения конструкций. Приведено обоснование принятых конструктивных решений опытных конструкции рам-фрагментов для разработки программы проведения экспериментальных исследований рассматриваемой конструктивной системы при особых воздействиях.

Ключевые слова: живучесть, сборно-монолитный каркас, особое предельное состояние, физическая нелинейность.

P.A. KORENKOV¹, N.V. FEDOROVA¹, P.A. KAYDAS¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

RESISTANCE OF THE PRECAST - CAST-IN-SITU REINFORCED CONCRETE FRAMES OF CIVIL BUILDINGS UNDER SPECIAL EMERGENCY IMPACT

Abstract. The article presents a technique for carrying out experimental and numerical studies of reinforced concrete frame-fragments of a prefabricated monolithic reinforced concrete structural system of multi-storey buildings. The purpose of the research was to determine the nature of the change in the parameters of static-dynamic deformation and force resistance of the proposed structural system both at the stage of operation and during an emergency impact caused by the shutdown of one of the elements - the corner column of the first floor. To increase the resistance of the system under study to local or progressive collapse, new design solutions for the crossbars of the prefabricated monolithic frame are proposed, which make it possible to increase its resistance to a sudden change in power flows in the structural system under consideration. Analytical dependencies are proposed to determine the parameters of the intermedium contact zone in the prefabricated-monolithic structure of the crossbar. The solution of the problems under consideration was carried out using the LIRA-SAPR software package, taking into account material operation diagrams that take into account the static-dynamic nature of the loading of structures. The substantiation of the adopted design solutions for experimental designs of frame fragments for developing a program for conducting experimental studies of the structural system under consideration under special effects is given.

Keywords: *survivability, precast-monolithic frame, special limiting state, material nonlinearity.*

Введение

В связи с введением в строительную практику более жестких требований в части обеспечения конструктивной безопасности проектируемых и подлежащих реконструкции строительных объектов, вопросы обеспечения стойкости к прогрессирующему обрушению несущих систем зданий не теряют своей актуальности. Только за последний годы объем публикаций по данной тематике кратно возрос [1].

С позиций сокращения сроков возведения объектов и снижения их материалоемкости, эффективными и наиболее массовыми считаются технологические системы гражданских зданий из индустриального домостроения. Помимо экономической привлекательности [2, 3], существующие типы конструктивных индустриальных систем для массового строительства не лишены недостатков конструктивного характера: они имеют "жесткие" объемно-планировочные схемы с ограниченными размерами помещений; однообразную пластику фасадов, низкий уровень защиты от особых, в том числе аварийных воздействий (вследствие использования в них только односторонних конструктивных связей) [4].

Анализу поведения различных типов сборно-монолитных конструкций как на стадии эксплуатации [5-8], так и при различных аварийных воздействиях [9-14] посвящены работы отечественных и иностранных ученых. При этом, вопросам экспериментальной проверки теоретических результатов, полученных в основном при помощи программных комплексов, уделяется не достаточное внимание. Можно отметить лишь отдельные работы российских Осовских Е.В. [15], Соколова Б.С. и Трошкова Е.О. [16, 17] и зарубежных Alshaikh I.M.H. [18], Huber J.A.J. [19] исследователей изучавших вопросы действительной работы наиболее распространенных типов узловых соединений. Массовое использование в строительной практике новых типов несущих систем требует комплексного сопровождения исследованиями их действительной работы на различных стадиях их жизненного цикла: изготовление, транспортировка, монтаж, работа в составе несущей системы. В условиях современных вызовов к этому списку необходимо добавить природные либо техногенные аварийные воздействия [26].

Рассматривая наиболее распространенные приемы экспериментальных исследований сопротивления конструктивных систем прогрессирующему обрушению, в виде квазистатических испытаний на отдельных подконструкциях, выделенных методом декомпозиции из каркаса здания, описанные в работах Yu J. и Tan K.H. [20], Kang S.-B., Tan K. H. и Yang E.-H. [21], Forquin P. и Chen W. [22], Han Q., Li X., Liu M. и Spencer B. F. [23], можно отметить использование гидравлических домкратов, передающих усилие на конструкцию при контролируемой скорости перемещения подвижной части нагружающего устройства, можно отметить, что такой способ противоречит динамическому характеру исследуемых процессов. Способ моделирования нагрузок на экспериментальные конструкции посредством механической рычажной системы, описанный в работах [28, 29] более строго отвечает действительному характеру работы при локальном выключении из работы элементов несущей системы.

В связи с этим целью работы является изучение особенностей деформирования и разрушения железобетонных сборно-монолитных рам при изменении расчетной схемы вследствие локального аварийного воздействия, разработка алгоритма и проведение численных исследований по обоснованию конструктивных мероприятий для защиты от таких воздействий.

Модели и методы

Для выявления особенностей деформирования, разрушения и трещинообразования стержневых сборно-монолитных железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях, связанных с мгновенным удалением одного из несущих элементов системы, разработана методика испытаний на физических моделях железобетонных рам,

изготовленных в масштабе 1:6. Геометрические размеры и схема армирования опытной конструкции железобетонной рамы представлены на рисунке 1.

Материал рам первой и второй серии: элементы сборного железобетона выполнены из бетона класса В35, монолитные участки из бетона класса В50. Армирование сборной и монолитной части выполнено пространственными каркасами с продольной арматурой диаметром 4 мм класса В500, и поперечной диаметром 1,5 мм проволоочной арматурой с $R_{s,p}=300$ МПа.

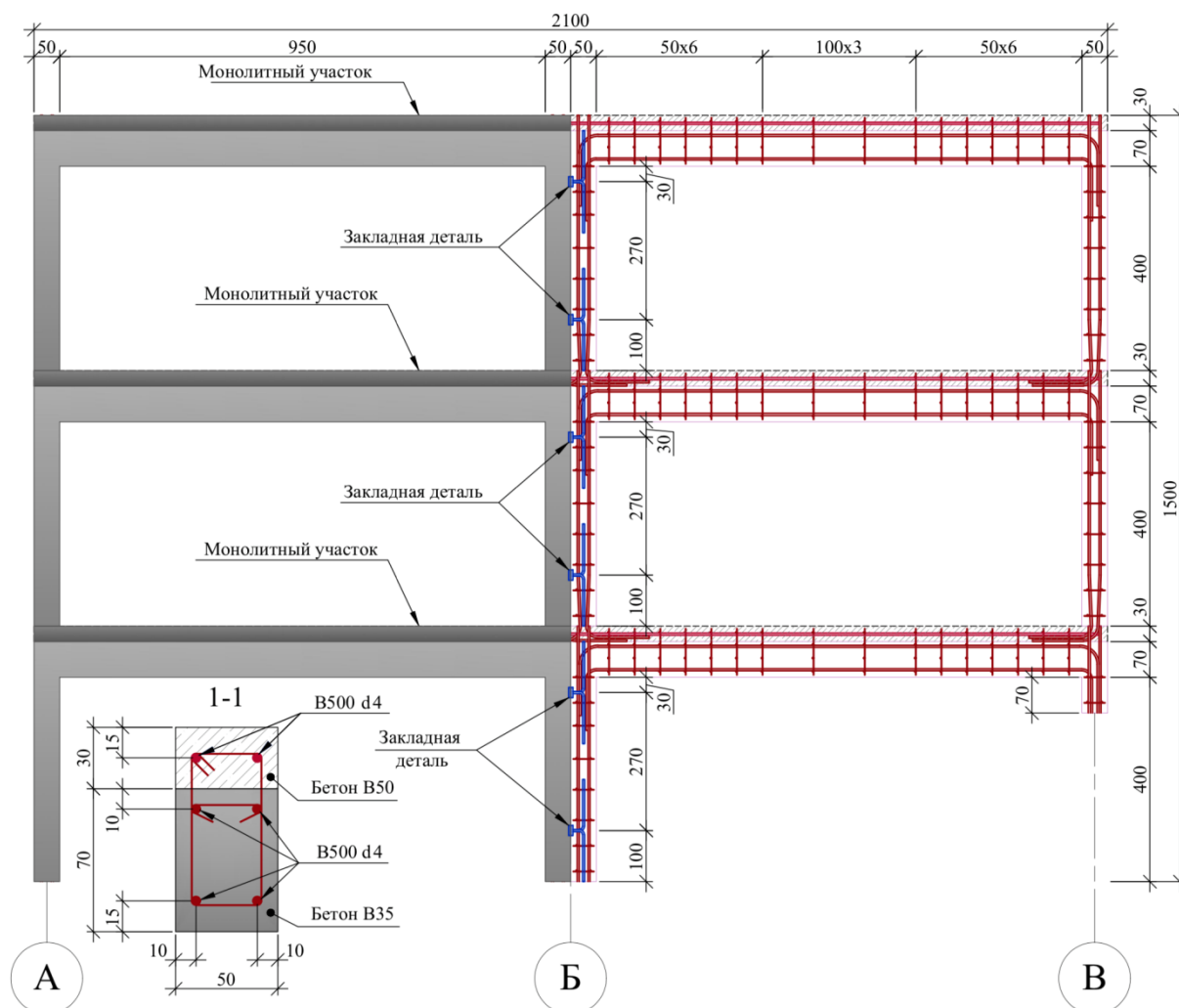


Рисунок 1 – Опалубочный чертеж (а) и схема армирования (б) модели сборно-монолитной железобетонной рамы

Ключевой особенностью рассматриваемой системы является характер сопряжения сборных элементов между собой, позволяющий изготавливать сборные части в заводских условиях и объединять в условиях строительной площадки с минимальными затратами трудовых ресурсов, при сохранении высокого уровня надежности стыковых соединений. Предложенные конструкции рам обеспечивают их адаптивную приспособляемость при внезапных изменениях силовых потоков от особых воздействий.

Объединение сборной и монолитной частей в единую конструкцию осуществляется при помощи сварки закладных деталей, расположенных по торцам вертикальных элементов и выпусков из сборной части арматуры с последующим замоноличиванием. Рамы изготавливаются двух серий, отличающихся друг от друга местом локального удаления колонны. В раме первой серии рассматривается удаление крайней колонны, в раме второй серии – средней колонны.

Определение параметров межсредовой зоны контакта в сборно-монолитной конструкции ригеля.

Ключевым элементом, определяющим характер поведения рассматриваемого типа конструктивных систем является учет работы сопрягаемых элементов сечения: сборного и монолитного бетона, а также поперечной арматуры.

Характер работы шва на контакте сопряжения двух бетонов при учете влияния поперечной арматуры был принят в соответствии с [24]. Принятые здесь гипотезы получили экспериментальное подтверждение в исследовании [25], где величина приведенного модуля сдвига шва может быть определена как отношение сдвигающих усилий к значению взаимного смещения смежных элементов составного сечения, приведенное к единице длины. Расчетная схема межсредовой зоны контакта, для определения усилий в зоне контакта монолитного и сборного бетона с учетом поперечной арматуры представлена на рисунке 2.

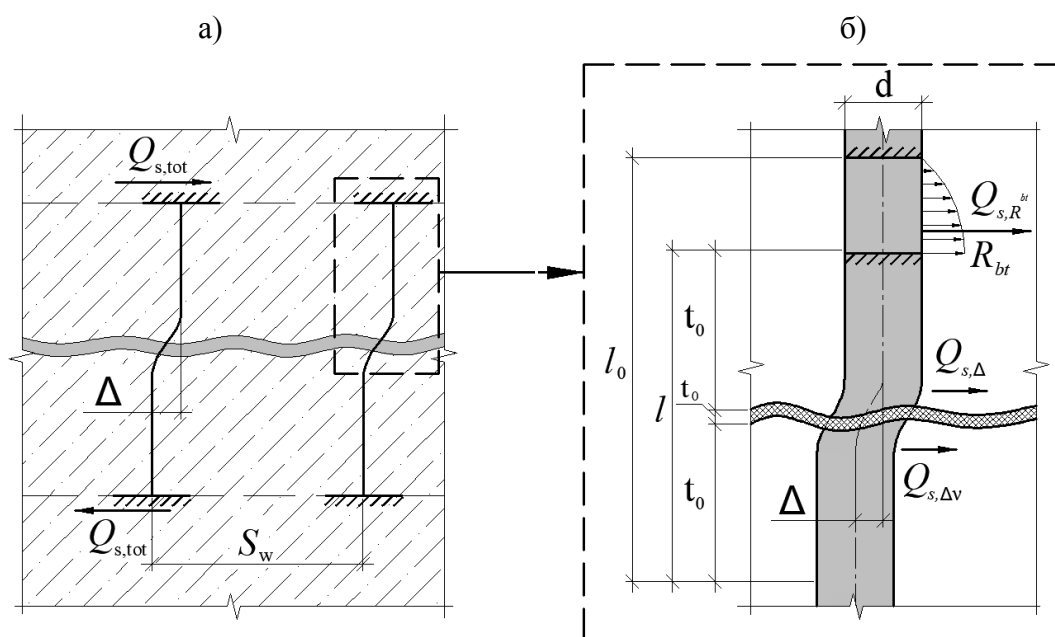


Рисунок 2 – Схема деформирования зоны контакта (а) и расчетная схема для определения поперечных сил в поперечной арматуре (б)

Армированная зона контакта представляет собой общий случай, при котором сдвигающие усилия воспринимают как бетон шва сдвига, так и поперечные стержни, пересекающие зону сопряжения. На стадии работы бетона до нарушения сплошности составного сечения (рисунок 1 б) сдвигающие усилия в шве контакта воспринимаются как за счет сопротивления бетона контактной зоне сдвигу $Q_{b,sh}$, так и за счет работы поперечной арматуры $Q_{s,tot}$. Прочность контактной зоны будет определяться выражением:

$$T = Q_{b,sh} + Q_{s,tot}, \quad (1)$$

где $Q_{b,sh}$ – усилия сдвига, воспринимаемые бетоном зоны контакта;
 $Q_{s,tot}$ – то же, воспринимаемые арматурными стержнями-нагелями.

$$Q_{s,tot} = Q_{s,\Delta} + Q_{s,R_{bt}} + Q_{s,\Delta v}. \quad (2)$$

Здесь $Q_{s,\Delta}$, $Q_{s,R_{bt}}$, $Q_{s,\Delta v}$ – составляющие поперечной силы в арматурном стержне, соответственно, от перемещения Δ , от усилий отрыва в бетоне, от поворота арматурного стер, что $l_1 < 10d$.

Первое слагаемое правой части выражения (2) связано с изгибом поперечного стержня-нагеля и определяется как (3):

$$Q_{s,\Delta} = \frac{12B_{red}\Delta}{(2\bar{t}_0 + t_0)^3} \quad (3)$$

где B_{red} – изгибная жесткость поперечного стержня-нагеля; Δ – величина сдвига; \bar{t}_0 – расстояние до точки заделки арматурного стержня; t_0 – толщина шва сдвига; S_w – шаг поперечной арматуры; b – ширина балки.

Для численного примера напряжения сдвига примем на основании экспериментальных исследований [25] равными $1,4 \cdot 10^5$ кПа, при шаге поперечной арматуры 50 мм и ширине ригеля 50 мм величина $Q_{s,\Delta} = 35$ кН, при шаге поперечной арматуры 100 мм $Q_{s,\Delta} = 17,5$ кН.

Составляющая усилия нагельного эффекта, обусловленная отрывными усилиями в бетоне, может быть определена как:

$$Q_{s,R_{bt}} = 0,8R_{bt}b(0,5l_1 - l)$$

где l – расстояние между точками заделки поперечного стержня, l_1 – толщина включения в работу бетонного слоя.

$$Q_{b,sh} = R_{b,sh}A_{sh}$$

Выполнив подстановку числовых значений рассматриваемой конструктивной схемы (рисунок 1) в выражение (1) получим:

при шаге поперечной арматуры 50 мм:

$$T_{s=50} = 2 \cdot 1300 \cdot 0,00025 + 35 + 0,8 \cdot 1300 \cdot 0,05 \cdot (0,5 \cdot 0,03 - 0,01) = 35,91 \text{ кН}$$

при шаге 100 мм:

$$T_{s=100} = 2 \cdot 1300 \cdot 0,00025 + 17,5 + 0,8 \cdot 1300 \cdot 0,05 \cdot (0,5 \cdot 0,03 - 0,01) = 18,41 \text{ кН}$$

По полученному значениям максимальных усилий, воспринимаемым в плоскости сдвига при численном расчете опытной конструкции рамы назначались параметры конечных элементов в зависимости от сетки их разбиения и шага поперечной арматуры (см. рисунок 1). Сдвигающие напряжения в плоскости стыка бетона омоноличивания со сборными элементами, действующие в результате несовместной усадки и ползучести составляющих бетонов, при моделировании стыка в первом приближении не учитывались ввиду их незначительного влияния на параметры исследуемого динамического деформирования [26].

Учет совместной работы сборной и монолитной части выполнен при помощи двухузловых конечных элементов нелинейных упругих связей. При моделировании сварного стыка закладных деталей учтена жесткость сварного на срез и на разрыв.

Для оценки характера динамического перераспределения силовых потоков между конструктивными элементами вторичной расчетной схемы рассматриваемой модели железобетонной рамы был выполнен динамический расчет на внезапное удаление колонны. Нагрузка в виде сосредоточенных сил была приложена в 1/3 расчетного пролета на ригели первого, второго и третьего соответственно. Время динамического воздействия при котором были достигнуты максимальные перемещения составило 0,18 секунды. В соответствии с полученным значением времени были скорректированы прочностные и деформационные характеристики конструкционных материалов. В процессе расчетного анализа были учтены факторы демпфирования с использованием коэффициентов Рэлея.

Для обоснования расположения средств измерения и типа используемой измерительной аппаратуры на масштабной модели железобетонной двухэтажной двухпролетной рамы и разработки программы проведения испытаний был выполнен расчетный анализ живучести рамы в динамической постановке, с учетом физической нелинейности деформирования материалов и конструктивной нелинейности поведения элементов конструктивной системы.

Результаты исследования и их анализ

В результате выполненного расчета был выявлен характер изменения во времени внутренних усилий для наиболее нагруженного элемента конструктивной системы (рисунок 3), перемещения и ускорения точек, получивших наибольшее приращение (рисунок 4), а также выявлены элементы, в которых были достигнуты критерии особого предельного состояния.

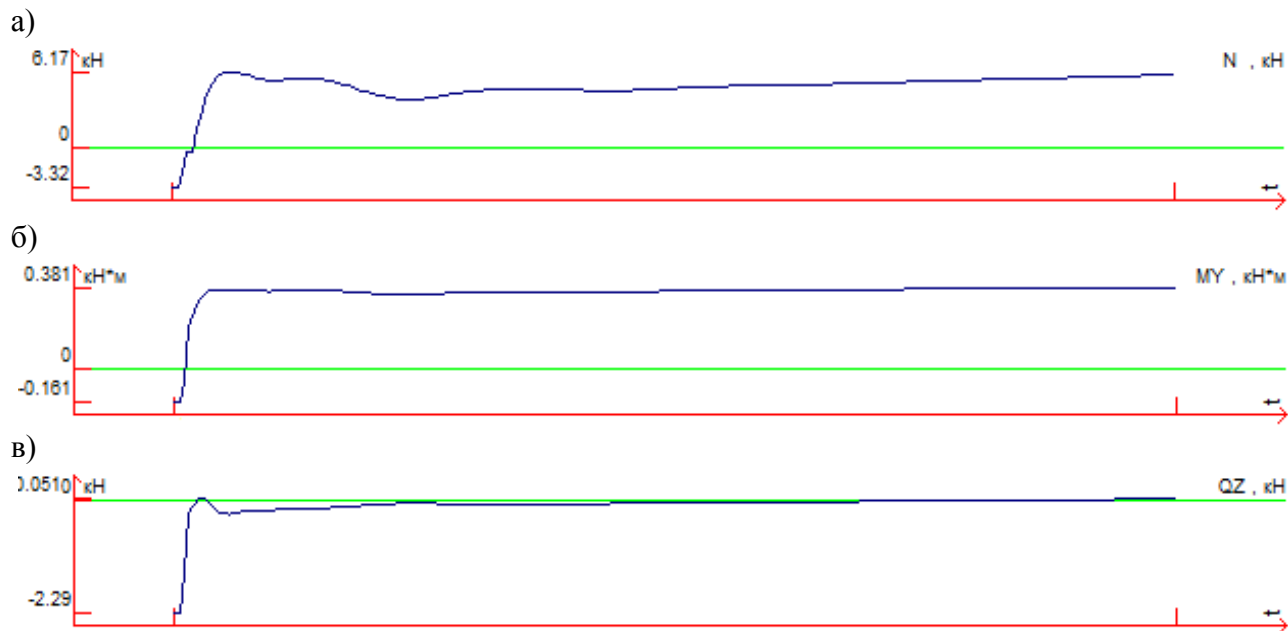


Рисунок 3 – Характер изменения во времени продольной силы (а), изгибающего момента (б) и поперечной силы (в) в опорном сечении ригеля над удаленной колонной

Анализируя характер изменения внутренних усилий во времени для опорного сечения над удаляемой колонной, можно отметить, что значение продольной силы за время динамического воздействия увеличилось в 2 раза, и поменяло знак, изгибающие моменты получили двукратное приращение, а поперечная сила уменьшилась практически до нулевых значений.

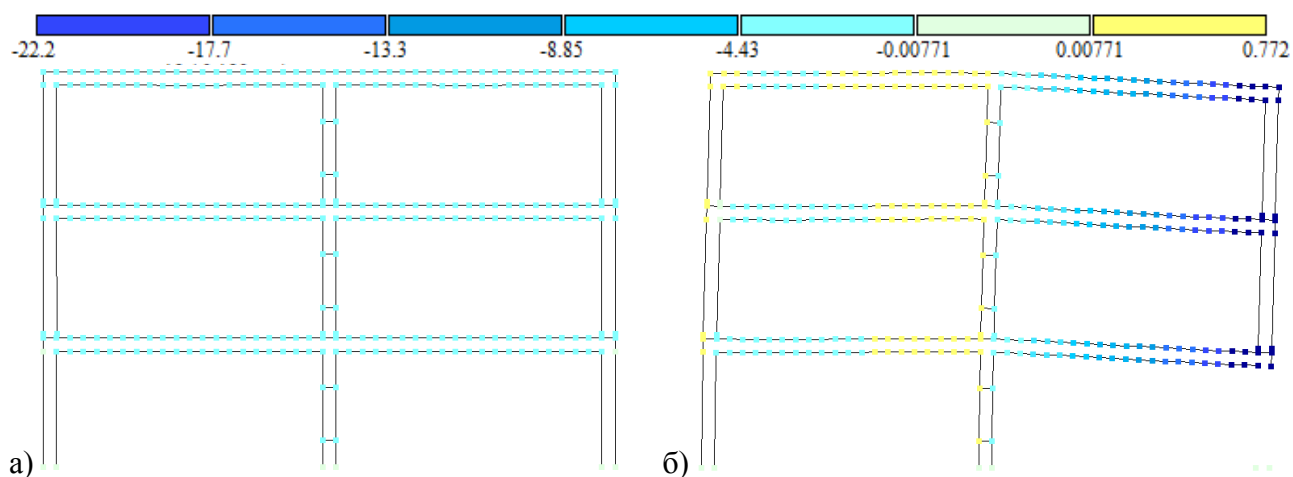


Рисунок 4 – Максимальные вертикальные перемещения в конструктивной системе при совместном приложении проектной нагрузки (а) и аварийного воздействия (б)

Относительный прогиб над удаленной колонной крайнего ряда составил 1/45 расчетного пролета, что свидетельствует о соблюдении деформационного критерия особого

предельного состояния, установленного нормами [27] на уровне $1/30 l_0$. Горизонтальные смещения находились в пределах $1/100$ высоты всей конструктивной системы. Отмечался также взаимный сдвиг конструкций сборных элементов рам между собой, что обусловлено вовлечением в работу связей сдвига между элементами сборной и монолитной части конструктивной системы.

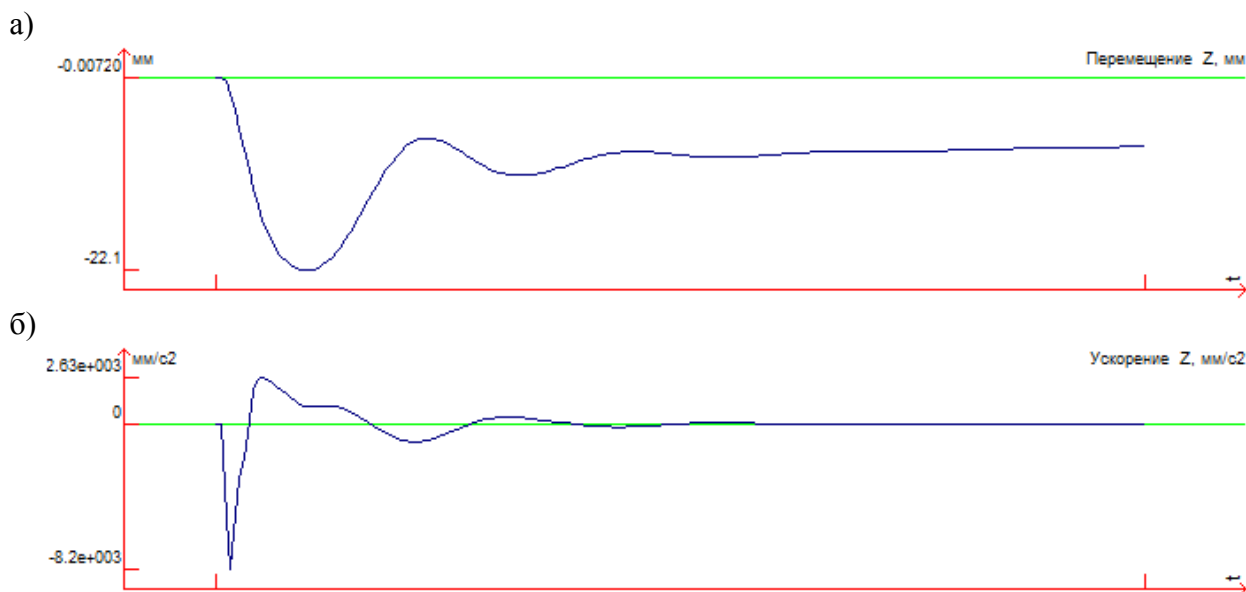


Рисунок 5 – Изменение во времени перемещений (а) и ускорений (б) узла над удаленной колонной

По результатам динамического расчета максимальное перемещение узла рамы в месте над удаленной колонной, было достигнуто в момент времени $t = 0,180$ секунды от начала аварийного воздействия и составило $1/45$ расчетного пролета (рисунок 5 а). В процессе колебаний после первоначального ударного воздействия, колебания прекратились, и остаточное значение прогиба составило $1/125 l_0$. Величина вертикального ускорения в процессе колебательного процесса меняла свое значение в интервале от 8,2 до 2,6 м/с², с последующим затуханием в момент времени $t = 0,190$ секунды (рисунок 5 б). Также необходимо отметить, что достижение критериев особого предельного состояния наступило в ригелях, примыкающих к неразрушенной центральной колонне по оси «Б», на всех трех этажах рассматриваемой рамы.

Методика экспериментального исследования опытной рамы.

На основании представленных результатов численного моделирования процесса деформирования элементов сборно-монолитной железобетонной рамы, конструкция которой представлена на рисунке 1, предложена схема проведения испытаний (рисунок 6).

Выполненный сравнительный анализ условий моделирования по критериям подобия [28] позволил рекомендовать использование функционально подобной физической модели, для которой выполняются условия, разработанные в работе [29].

В соответствии с методикой испытания деформирования модели железобетонной рамы производятся в два этапа. На первом этапе к узлам опытной модели конструктивной системы с помощью рычажной системы ступенчато прикладывается гравитационная нагрузка. При этом возможные перемещения опытной конструкции железобетонной рамы из своей плоскости ограничиваются с помощью устройства двусторонних линейных связей, допускающих свободное деформирование в плоскости конструкции.

На втором этапе для моделирования внезапного удаления средней или крайней колонны первого этажа используется запатентованный способ испытаний [30], согласно которого моделирование мгновенного удаления железобетонной колонны выполняется

специальным устройством, состоящим из трехшарнирной стойки и жесткой опоры, соединенной с центральным шарниром. При использовании этого устройства трехшарнирная стойка превращается в мгновенно изменяемую систему, что эквивалентно мгновенному удалению связи.

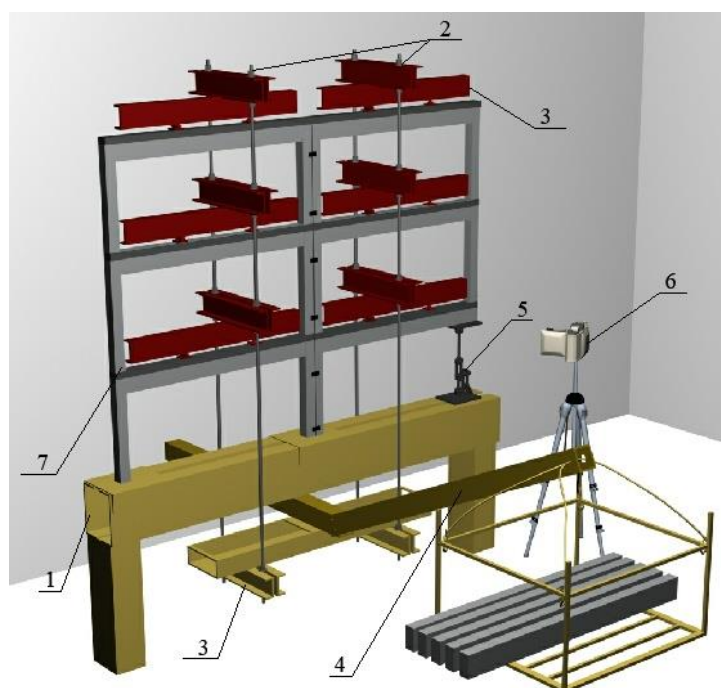


Рисунок 6 – Общий вид стенда для испытаний опытной конструкции железобетонной рамы первой серии: 1 - силовая рама; 2 - тяжи; 3 - распределительная балка; 4 - рычаг; 5 - устройство выключающей связи, 6 - высокочастотная видеокамера; 7 - опытная конструкция железобетонной рамы

Деформации бетона и арматуры в наиболее нагруженных сечениях опытной конструкции рамы измеряются методом электротензометрии. Наибольшее внимание в процессе испытаний уделяется межсредовой зоне контакта сборного и монолитного слоев, являющееся [31] концентратором сдвиговых напряжений. В процессе испытания с помощью системы визуального отслеживания «Tracker» контролируются также горизонтальные и вертикальные перемещения стоек и ригелей на участках с наибольшими динамическими перемещениями.

Для измерения динамических перемещений в испытываемой опытной конструкции железобетонной рамы после срабатывания специального устройства, моделирующего внезапное удаление угловой колонны, в характерных узлах опытной конструкции производится видеосъемка, с помощью цифровых видео камер с частотой съемки не менее 240 кадров в секунду.

Контроль частоты и период вынужденных колебаний опытной конструкции после аварийного воздействия, а также параметров, характеризующих процесс затухания колебаний, осуществляется с помощью осциллографа.

Выводы

Выполненный динамический анализ моделирования аварийного воздействия в виде мгновенного удаления из железобетонной рамы ее угловой колонны, позволил установить, что достижение особого предельного состояния в конструктивной системе сборно-монолитной рамы локализуется в зоне, примыкающей к удаляемой колонне. По результатам численного анализа показана эффективность предложенного конструктивного решения сборно-монолитной конструктивной системы для защиты от прогрессирующего обрушения.

Предложена крупномасштабная модель железобетонного сборно-монолитного каркаса многоэтажного здания и методика экспериментальных исследований процесса деформирования, трещинообразования и разрушения при внезапной структурной перестройке конструктивной системы.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (договор № 075-15-2021-312-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct.* 2018. 173. Pp. 122–149.
2. Мониторинг объемов жилищного строительства. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/zhilishnaya-politika/8/>
3. Мажанская Е.В. Экономические факторы, влияющие на стоимость строительства / Е.В. Мажанская, А.С. Пасечник, Д.А. Калинина [и др.] // *Экономические науки*. 2020. № 184. С. 58-61. doi:10.14451/1.184.58
4. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Шапиро Г.И., Гасанов А.А. Расчеты крупнопанельных зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения методами предельного равновесия и конечного элемента // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2016. № 4. С. 109-111.
5. Krentowski J.R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 121, 105059. ISSN 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105059>.
6. Sokolov B.S. Construction of Deformation Diagrams of Concrete Under Shear Based on the Author's Theory of Anisotropic Materials Power Resistance to Compression and Deformation Theory of Plasticity // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. No. 15. Pp. 149–160.
7. Baran E., Mahamid M., Baran M., Kurtoglu M., Torra-Bilal I. Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction // *Engineering Structures*. 2021. 246, 113005.
8. Barański J., Berkowski P. Computer Modelling of Precast Large-panel Buildings with Degraded Horizontal Joints // *Procedia Engineering*. 2015. 111. Pp. 89–96.
9. Xia K., Hu X. & Xue W. Experimental studies on in-plane connections of composite beam-precast concrete shear wall under reversed cyclic loading // *Structures*. 2021. 34. 1961–1972.
10. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 8. Pp. 155–162.
11. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Емельянов С.Г. 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.
12. Savin S.Y., Fedorov S.S. Stability analysis of reinforced concrete building frames damaged by corrosion under static-dynamic loading // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1425, 012043.
13. Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Almusallam T.H., Abbas H. Finite element analysis for progressive collapse potential of precast concrete beam-to-column connections strengthened with steel plates // *Journal of Building Engineering*. 2021. 34, 101875.
14. Fedorova N., Tamrazyan A., Korenkov P. Industrial constructive system of civil buildings of increased survivability // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 04003
15. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Фомичев С.И., Прочность железобетонных платформенных стыков жилых зданий с перекрестно-стеновой системой из панельных элементов // *Жилищное строительство*. 2009. № 12. С. 12-16.
16. Соколов Б.С., Трошков Е.О. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований штепсельных стыков сборных железобетонных колонн с плитами перекрытий // *Жилищное строительство*. 2017. № 7. С. 41-46.
17. Трошков Е.О. Экспериментальные исследования штепсельных стыков второго типа на сдвиг // Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сборник докладов IX Академических чтений РААСН – Международной научной конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 85–90.
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, Aref A. Abadel, Mohammed Alrubaidi. Precast RC structures' progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements, *Structures*, 2022. Vol. 37. Pp. 338-352. ISSN 2352-0124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.086>.

19. Johannes A.J. Huber, Hercend Mpidi Bit, Thomas Tannert, Sven Berg. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240, 112362. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112362>.
20. Yu J., Tan K.H. Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario // *J. Struct. Eng.* 2013. Vol. 139. No. 2. Pp. 233–250.
21. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites // *Eng. Struct.* 2015.
22. Forquin P., Chen W. An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 152. P. 1068–1084.
23. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam-Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention // *J. Struct. Eng.* 2019. Vol. 145. No. 5. P. 04019020.
24. Колчунов В.И., Панченко Л.А. Расчет составных тонкостенных конструкций. М.: АСВ, 1999. 281 с.
25. Колчин Я.Е., Колчунов В.И. Исследование закономерностей деформирования и разрушения зон контакта железобетонных составных конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2010. № 2(28). С. 17-22.
26. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова. М. : АСВ, 2014. 208 с.
27. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования». ЭС НТИ "Техэксперт", 2017. 35 с.
28. Korenkov P. Determination of the scale factor in the physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads / P. Korenkov, V. Chemodurov, O. Korenkova, I. Manaenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 23–26 сентября 2020 года. – 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 2020. P. 052053. doi:10.1088/1757-899X/869/5/052053. EDN WSCSUY.
29. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1425. № 1.
30. Патент № 2642542 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/60. Устройство для экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах : № 2016130263 : заявл. 22.07.2016 :опубл. 25.01.2018 / Н.В. Ключева, П.А. Кореньков ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского". EDN QHFNGF.
31. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 54-60. EDN UWOAEP.

REFERENCES

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct.* 2018. 173. Pp. 122–149.
2. Monitoring of housing construction volumes. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/zhilishnaya-politika/8/>
3. Mazhanskaya E.V. Ekonomicheskie faktory, vliyayushchie na stoimost' stroitel'stva [Economic factors that affect the cost of construction] / E.V. Mazhanskaya, A.S. Pasechnik, D.A. Kalinina [et al.] // *Economic Sciences*. 2020. No. 184. Pp. 58-61. doi:10.14451/1.184.58 (rus)
4. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V., Shapiro G.I., Gasanov A.A. Raschety krupnopanel'nykh zdaniy na ustoychivost' protiv progressiruyushchego obrusheniya metodami predel'nogo ravnovesiya i konechnogo elementa [Calculations of large-panel buildings for stability against progressive collapse by the methods of limiting equilibrium and finite element]. *ACADEMIA. Architecture and construction*. 2016. No. 4. Pp. 109-111. (rus)
5. Krentowski J.R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 121, 105059. ISSN 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105059>.
6. Sokolov B.S. Construction of Deformation Diagrams of Concrete Under Shear Based on the Author's Theory of Anisotropic Materials Power Resistance to Compression and Deformation Theory of Plasticity // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. No. 15. Pp. 149–160.
7. Baran E., Mahamid M., Baran M., Kurtoglu M., Torra-Bilal I. Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction // *Engineering Structures*. 2021. 246, 113005.
8. Barański J., Berkowski P. Computer Modelling of Precast Large-panel Buildings with Degraded Horizontal Joints // *Procedia Engineering*. 2015. 111. Pp. 89–96.
9. Xia K., Hu X. & Xue W. Experimental studies on in-plane connections of composite beam-precast concrete shear wall under reversed cyclic loading // *Structures*. 2021. 34. 1961–1972.
10. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 8. Pp. 155–162.

11. Savin S.Yu., Fedorova N.V., S.G. Emelyanov S.G. Analiz zhivuchesti sborno-monolitnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy iz zhelezobetonnykh panel'no-ramnykh element pri avariynnykh vozddeystviyakh, vyzvannykh poterey ustoychivosti odnoy iz kolonn [Survivability Analysis of Reinforced Concrete Frameworks of Multi-storey Buildings Made of Frame-panel Elements Using Combination of Prefabricated and Monolithic Concrete in Case of Accidental Impacts Caused by Loss of Stability of One of the Columns]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2018. No. 12. Pp. 3-7. (rus)
12. Savin S.Y., Fedorov S.S. Stability analysis of reinforced concrete building frames damaged by corrosion under static-dynamic loading // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1425, 012043.
13. Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Almusallam T.H., Abbas H. Finite element analysis for progressive collapse potential of precast concrete beam-to-column connections strengthened with steel plates // Journal of Building Engineering. 2021. 34, 101875.
14. Fedorova N., Tamrazyan A., Korenkov P. Industrial constructive system of civil buildings of increased survivability // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04003
15. Kolchunov V.I., Osovskikh E.V., Fomichev S.I. Prochnost' zhelezobetonnykh platformennykh stykov zhilykh zdaniy s perekrestno-stenovoy sistemoy iz panel'nykh elementov [Strength of reinforced concrete platform joints of residential buildings with a cross-wall system of panel elements]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2009. No. 12. Pp. 12-16/ (rus)
16. Troshkov E.O., Sokolov B.S. Sravneniye rezul'tatov komp'yuternogo modelirovaniya I eksperimental'nykh issledovaniy shtepsel'nykh stykov sbornnykh zhelezobetonnykh kolonn s plitami perekrytiy [Comparison of the results of computer modeling and experimental research of plug joints of precast concrete columns with floor slabs]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2017. No 7. Pp. 41-46. (rus)
17. Troshkov E.O. Eksperimental'nyye issledovaniya shtepsel'nykh stykov vtorogo tipa na sdvig [Experimental studies of plug joints of the second type for shear]. Dolgovechnost', prochnost' I mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona I drugikh stroitel'nykh materialov: Sbornik dokladov IX Akademicheskikh chteniy RAASN – Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Durability, strength and fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other building materials: Collection of reports of the IX Academic Readings of the RAACS - International Scientific Conference]. Saint Petersburg :SPbGASU, 2016. Pp. 85–90. (rus)
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, Aref A. Abadel, Mohammed Alrubaidi. Precast RC structures' progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements, Structures, 2022. Vol. 37. Pp. 338-352. ISSN 2352-0124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.086>.
19. Johannes A.J. Huber, Hercend Mpidi Bitu, Thomas Tannert, Sven Berg. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems // Engineering Structures. 2021. Vol. 240, 112362. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112362>.
20. Yu J., Tan K.H. Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario // J. Struct. Eng. 2013. Vol. 139. No. 2. Pp. 233–250.
21. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites // Eng. Struct. 2015.
22. Forquin P., Chen W. An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages // Constr. Build. Mater. 2017. Vol. 152. P. 1068–1084.
23. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam-Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention // J. Struct. Eng. 2019. Vol. 145. No. 5. P. 04019020.
24. Kolchunov V.I., Panchenko L.A. Raschet sostavnykh tonkostennykh konstrukcij [Calculation of composite thin-walled structures]. M.: ASV, 1999. 281 p. (rus)
25. Kolchin YA.E., Kolchunov V.I. Issledovanie zakonornostej deformirovaniya i razrusheniya zon kontakta zhelezobetonnykh sostavnykh konstrukcij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2010. No. 2(28). Pp. 17-22. (rus)
26. Kolchunov V.I. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnykh vozddeystviyakh [Survivability of buildings and structures under beyond-design impacts] / V.I. Kolchunov, N.V. Klyueva, N.B. Androsova, A.S. Buhtiyarova. M. : ASV, 2014. 208 p. (rus)
27. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressivnykh obrusheniya. Pravila proektirovaniya. [Protection of buildings and structures from progressive collapse] ES NTI "Tekhekspert", 2017. 35 p. (rus)
28. Korenkov P. Determination of the scale factor in the physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads / P. Korenkov, V. Chemodurov, O. Korenkova, I. Manaenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 23–26 сентября 2020 года. – 55 GiaiPhong Road, Hanoi, 2020. P. 052053. doi:10.1088/1757-899X/869/5/052053. EDN WSCSUY.
29. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1425. No. 1.
30. Patent № 2642542 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 3/60. Ustrojstvo dlya eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v ramno-sterzhnevyykh konstruktivnykh sistemah : No. 2016130263 : zayavl. 22.07.2016 : opubl. 25.01.2018 / N.V. Klyueva, P.A. Koren'kov ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe

obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Krymskij federal'nyj universitet imeni V.I. Vernadskogo". EDN QHFNGF

31. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobyh vozdeystviyah // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Deformation models of reinforced concrete under special effects]. 2018. No. 8. Pp. 54-60. EDN UWOAEP (rus)

Информация об авторах:

Кореньков Павел Анатольевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент, и.о. зав. кафедрой технологии, организации и управления в строительстве. E-mail: KorenkovPA@mgsu.ru

Федорова Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой архитектурно-строительного проектирования. E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Кайдас Павел Анатольевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: KaydasPA@mgsu.ru

Information about authors:

Korenkov Pavel An.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate of technical science, docent, acting head of the department of Technology, Organization and Management in Construction. E-mail: KorenkovPA@mgsu.ru

Fedorova Natalya V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Advisor of RAACS, doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design in Construction. E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Kaydas Pavel An.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures E-mail: KaydasPA@mgsu.ru