

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, М.Д. АНТОНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ДИНАМИКА БЕЗБАЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ПЛИТ ПРОДАВЛИВАНИЕМ

Аннотация. Рассмотрен подход к оценке динамических эффектов для железобетонных каркасов сооружений с безбалочными перекрытиями при комбинированных запроектных воздействиях. Первичные воздействия предполагают превышение эксплуатационных нагрузок, которое вызывает повреждения узла соединения плиты и колонны от продавливания до наступления вторичного запроектного воздействия. Вторичные запроектные воздействия включают рассмотрение удаления из расчетной схемы любой из колонн за конечный промежуток времени. Анализ динамических эффектов выполнен на основе двух подходов: первый основан на энергетическом методе Г.А. Гениева и предполагает квазистатическую оценку напряженно-деформированного состояния поврежденной системы; второй – анализ переходного динамического процесса с учетом физической и геометрической нелинейности. Предложен приближенный подход к моделированию повреждений железобетонной плиты от продавливания и рассмотрены дальнейшие перспективы его совершенствования. Установлена степень опасности запроектных воздействий для предварительно поврежденных продавливанием конструкций, а также влияние этих повреждений на живучесть каркасов при запроектных воздействиях. Рассмотрен пример оценки живучести на модели каркаса подземного паркинга при наличии повреждений от продавливания для одного из узлов соединения плиты и колонны.

Ключевые слова: живучесть, запроектное воздействие, безбалочный каркас, продавливание, динамический анализ, прогрессирующее разрушение, численное моделирование, железобетонные конструкции.

A.V. ALEKSEYTSSEV¹, M.D. ANTONOV¹

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

DYNAMICS OF REINFORCED CONCRETE NON-BEAM FRAMES IN CASE OF DAMAGE TO SLABS PUNCHING

Abstract. An approach to the assessment of dynamic effects for reinforced concrete non-beam frames of structures under combined emergency actions is considered. Primary impacts imply an excess of operational loads, which causes damage to the slab-column junction from punching to the onset of a secondary impacts. Secondary impacts include considering the removal of any column from the design model over a finite time. The analysis of dynamic effects based on two approaches: the first is based on the energy method of G.A. Geniev and assumes a quasi-static assessment of the stress-strain state of the damaged system; the second is the analysis of the transient dynamic process taking into account physical and geometric nonlinearity. An approximate approach to modeling the damage of a reinforced concrete slab from punching is proposed and further prospects for its improvement are considered. The degree of danger at emergency impacts for structures pre-damaged by punching, as well as the influence of these damages on the survivability of frames under these effects, has been established. An example of assessing survivability on a model of an underground parking frame in the presence of damage from punching for one of the column-slab joints is considered.

Keywords: progressive collapse resistance, emergency actions, punching shear, dynamic analysis, column failure, numerical modeling, reinforced concrete structures.

Введение

Современные требования к обеспечению безопасности железобетонных каркасов зданий и сооружений предполагают обеспечение их живучести при запроектных воздействиях. Требования по живучести отражаются в нормативных документах [1, 2] и в научных исследованиях [3-5]. Особое внимание при этом уделяется процессам работы узла соединения плиты и колонны в безбалочном каркасах монолитных зданий. При этом рассматриваются различные подходы к учету продавливания плиты колоннами [6-8]. Продавливание изучается преимущественно как явление, которое необходимо предупредить на этапе нормальной эксплуатации конструкции. Вместе с тем опыт обследования несущих конструкций показывает, что данное повреждение не вызывает прогрессирующего лавинообразного разрушения объекта. Однако влияние таких первичных повреждений на живучесть каркасов зданий при возникновении вторичных запроектных воздействий, связанных с выключением из расчетной схемы колонн, остается практически не изученным.

Процесс локальных повреждений, связанных с выключением из расчетной схемы колонн [9-12] носит характер переходного динамического процесса, который может моделироваться как с помощью квазистатического энергетического подхода, так и на основе шаговых методов прямого интегрирования уравнений движения поврежденной конструкции [13-15]. При этом для проектирования представляется необходимым выявление уровня динамических эффектов, связанных с локальными повреждениями колонн. Коэффициенты динамики, определяющие уровень динамического догружения конструкций, могут использоваться при оптимизации несущих конструкций такого типа с помощью современных эвристических алгоритмов [16-18], а также при анализе возможных механизмов разрушения, включающих эффекты разрушения бетона с образованием вантовых механизмов, а также возможной потери устойчивости сжатых элементов при их догружении или изменении жесткостей опорных узлов [19-21]. Следует отметить, что эффект продавливания может также возникнуть в результате локальных огневых воздействий, которые приводят к существенному снижению модуля упругости бетона, а, следовательно, и его прочности [22-24].

По результатам обзора исследований установлено, что вопрос обеспечения живучести каркасов с безбалочными перекрытиями при наличии предварительных повреждений узлов опирания плит и колонн продавливанием является актуальной задачей требующей изложения одного из возможных методологических подходов к ее решению.

Методы.

Рассмотрим подход к динамическому расчету железобетонной конструкции каркаса здания с безбалочным перекрытием. Современные программные комплексы позволяют выполнять моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в объемной постановке при дискретизации объемов бетона и арматуры на гексаэдрические или тетраэдрические конечные элементы. Однако такой подход для расчетов каркасов в целом даже с использованием современных 12-16 ядерных процессоров сдерживается высочайшей вычислительной емкостью и требованиями к оперативной памяти, в которой должна размещаться матрица жесткости размером от 32Гб и более. Поэтому будем формировать расчетную модель из условия возможности ее воспроизведения в реальных проектных условиях. Для оценки динамических эффектов будем использовать пластинчато-стержневую модель, в которой жесткости элементов приведены к бетону:

$$E_{b,red} = \frac{E_b A_b + E_s A_s}{A_b + A_s}, \quad G_{b,red} = \frac{0,4(1,5h_0 E_b + E_s A_{sw})}{1,5h_0 + A_{sw}}, \quad (1)$$

где E_b, E_s – начальные модули упругости бетона и арматуры соответственно, A_b, A_s – площади сечения бетона и продольной рабочей арматуры, A_{sw} – площадь сечения поперечной арматуры в проекции наклонного сечения длиной $1,5 h_0$ и шириной 1 м.

Модель нелинейной прочности бетона предусматривает различную сопротивляемость бетона растяжению и сжатию, для чего используется модифицированная для бетона модель Друкера-Прагера:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); \quad (2)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_b R_{bt}}{R_b + R_{bt}} \right), \quad B = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_{bt} - R_b}{R_b + R_{bt}} \right),$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в бетоне, R_b, R_{bt} – расчетные сопротивления сжатию и растяжению. Главные напряжения определяются на поверхности текучести задаваемой двумя параметрами: C – напряжения когезии (сцепления) в бетоне и углом внутреннего трения φ . Эти параметры определяются на основе физических или численных экспериментов, при этом $C = f(R_{bt})$, $\varphi = 30..35^\circ$. При необходимости этой моделью можно учесть и дилатацию бетона. Для арматуры нелинейное поведение моделируется в рамках модели Прандтля (билинейная диаграмма по СП 63.13330.2018). Физически и геометрически нелинейная задача решается с использованием метода Ньютона-Рафсона.

Квазистатический подход к учету динамических эффектов будем выполнять на основе энергетической теории Г.А. Гениева в соответствии с зависимостями, определяющими степень опасности напряженного состояния для нормальных и наклонных сечений, а также динамического догружения продольной силой:

$$M_{ult,D} = 2M_{ult,SDam} - M_{ult,S0}, \quad Q_{ult,D} = 2Q_{ult,SDam} - Q_{ult,S0}, \quad (3)$$

$$N_{ult,D} = 2N_{ult,SDam} - N_{ult,S0}, \dots$$

Здесь M, Q, N – внутренние усилия (изгибающий момент, продольная и поперечная сила соответственно); $|\bullet|_{ult,D}$ – динамический фактор; $|\bullet|_{ult,SDam}$ – статический фактор в системе, поврежденной запроектным воздействием; $|\bullet|_{ult,S0}$ – статический фактор в исходной неповрежденной системе.

Учет переходного динамического процесса, связанного с локальными повреждениями несущей системы, реализуем в рамках шагового метода прямого интегрирования в соответствии с уравнением с упрощенным учетом конструкционного демпфирования по Релею:

$$[M]\ddot{y}(t) + [K](\beta\dot{y}(t) + y(t)) = F(t), \quad (4)$$

где $[M], [K]$ это общие матрицы масс и жесткости конечно-элементной модели соответственно; $\ddot{y}(t)$, $\dot{y}(t)$, $y(t)$ это векторы ускорений, скоростей и узловых перемещений соответственно; $F(t)$ это вектор приведенной к узлам внешней нагрузки, β – коэффициент конструкционного демпфирования ($\beta = 0,05$ при отсутствии повреждений и нелинейной работы в нормируемом диапазоне деформаций).

Если присутствуют повреждения от продавливания и существенная геометрическая нелинейность, то по данным экспериментов, например [24], коэффициент конструкционного демпфирования принимается $\beta = 0,1 \div 0,2$. В рассматриваемых нами расчетах при наличии повреждений от продавливания принимаем $\beta = 0,15$. При этом на основе предварительного расчета на собственные колебания может определяться интервал частот, в которых будет возбуждаться форма колебаний, наиболее соответствующая запроектному воздействию. Демпфирование учитывается именно в этом интервале.

Моделирование повреждений в виде удаления опоры O за конечное время моделируем в динамической постановке с учетом времени динамической релаксации, рисунок 1. При этом система опорных связей заменяется эквивалентной системой опорных реакций R , изменяющихся во времени.

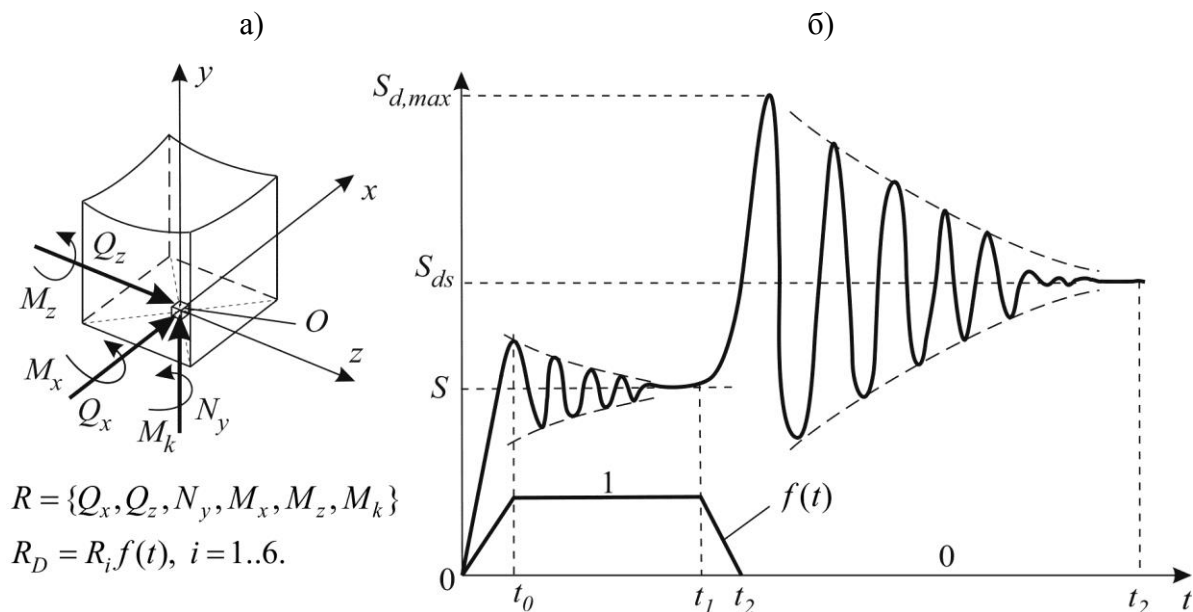


Рисунок 1 – К моделированию локального повреждения: система статически эквивалентных реакциям сил (а); характер изменения во времени динамического усилия в опасном сечении и вид функции $f(t)$ (б)

Эти реакции прилагаются в систему в течении времени t_0 . Интервал времени $[0; t_0]$ назначается из условия обеспечения устойчивости процесса численного интегрирования. Далее в течение интервала времени $(t_0; t_1]$ система совершает колебания и реализуется процесс динамической релаксации, завершающийся наступлением состояния, эквивалентного статическому нагружению при наличии опорных связей. Далее можно моделировать исключение связи, задавая интервал времени $(t_1; t_2]$, в течение которого значения реакций уменьшаются до нуля. В следующий интервал $(t_2; t_3]$ реакции не меняются, система совершает колебания, вызванные запроектным воздействием. Если колебания стабилизируются и затухают, а прогиб соответствует принятым в СП 385.1325800.2018 ограничениям $[S_{ds}]$, то считаем, что система обладает живучестью при данном запроектном воздействии.

Моделирование повреждений от продавливания реализуются следующим образом. Первый способ – это физическая эрозия (удаление) пластинчатых элементов из зоны примыкания колонны и плиты. Идентификация этих элементов должна выполняться в ходе предварительного нелинейного расчета с оценкой уровня главных деформаций (рисунок 2, а).

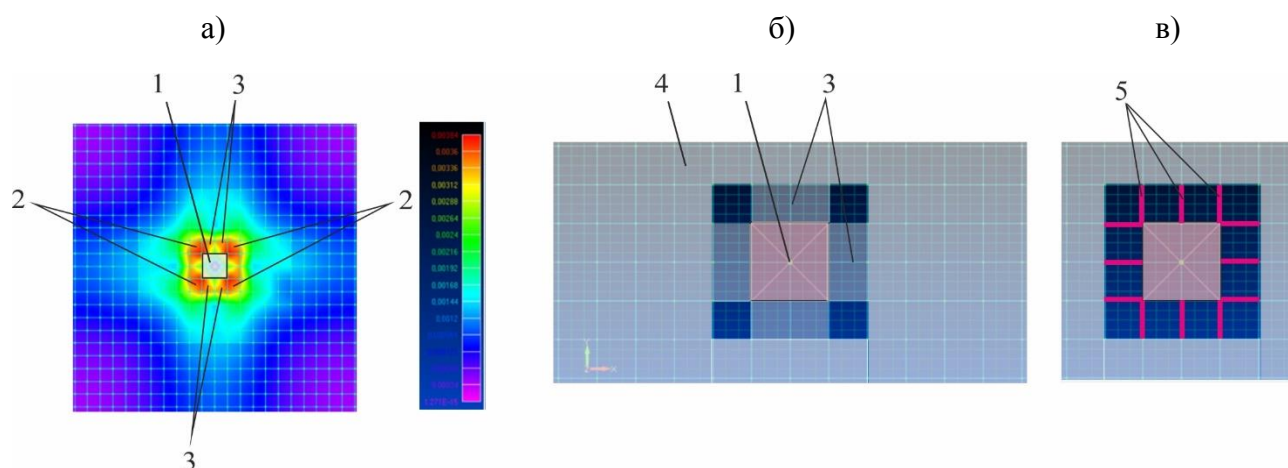


Рисунок 2 – Моделирование повреждений от продавливания: идентификация зоны возможных повреждений (а); моделирование повреждений введением элементов, испытывающих преимущественно мембранные деформации (б); моделирование выключение из работы бетона (в); 1-зона плиты над колонной; 2 – элементы, подлежащие удалению, 3 – элементы, испытывающие преимущественно мембранные деформации без сдвига; 4 – железобетонные элементы без повреждений; 5 – стержневые элементы арматуры

При этом в зоне поврежденного узла должна сгущаться сетка, а в месте удаления с учетом эксцентриситета расположения арматуры должны устанавливаться стержни с фактической площадью арматуры, приходящейся на удаленный элемент (рисунок 2,в). Второй способ предполагает коррекцию приведенных модулей продольной и поперечной деформации бетона введением в модель Друкера-Прагера функции разупрочнения, либо введением мембранных пластинчатых элементов с характеристиками, соответствующими выключению бетона из схемы армированного сечения (рисунок 2,б).

Результаты.

Для верификации модели Друкера-Прагера выполнялся подбор параметров условного сцепления и угла внутреннего трения для бетонной призмы класса В25 стандартных размеров 150x150x600 по критерию равенства предельной нагрузки величине $N_{ult} = R_b A_b = 326,25 \text{ кН}$. Результаты этого расчета при достижении уровня разрушающей нагрузки в 325 кН представлены на рисунке 3. При $C = 4,25 \text{ МПа}$, $\varphi = 30^\circ$ уровень напряжений в образце достигает 14,5 МПа, начинается квази-пластическое деформирование призмы с её последующим разрушением. Данные значения при наличии в бетоне арматуры, моделируемой путем задания стержневых элементов, имеющих общие узлы с бетоном, могут быть скорректированы. Работа под нагрузкой арматуры описывалась диаграммой Прандтля без упрочнения.

Рассмотрим результаты расчета фрагмента несущей системы одноэтажного подземного паркинга размерами ячейки 6x6 м, высотой 3м, загруженного равномерно распределённой по площади нагрузкой, включающей вес плиты и вес покрытия. Конструкция монолитная, размещена на сплошной железобетонной плите, поэтому опорные закрепления колонн считаем жесткими. Плита имеет сплошное сечение толщиной 200 мм, колонны массивные 40x40 см. Армирование плиты соответствует условиям нормальной эксплуатации под нагрузкой в 16,8 кН/м².

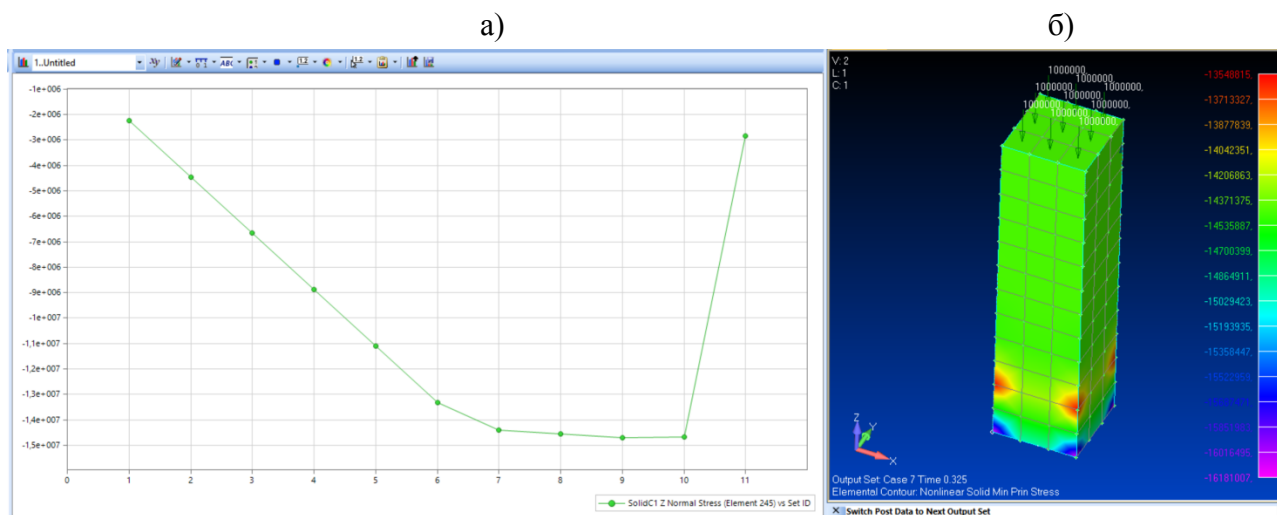


Рисунок 3 – Численный эксперимент по сжатию стандартной призмы на основе использования модели Друкера-Прагера: зависимость сжимающих напряжений от безразмерной параметрической нагрузки (а), модель призмы с визуализацией минимального главного напряжения (б)

Рассматривались следующие расчеты:

- быстрое локальное повреждение средней колонны среднего ряда без учета существующих повреждений от продавливания плиты колонной (А);
- то же с учетом моделирования повреждений от продавливания плиты колонной при сохранности продольной рабочей арматуры (Б).

Пластинчато-стержневая конечно-элементная модель объекта показана на рисунке 4,а. Процесс численного интегрирования длился 12 с. Одинарные связи в поврежденной колонне заменялись реакциями, статические эквиваленты которых в каждый момент времени умножались на значения функции, приведенные на графике рисунка 4,б.

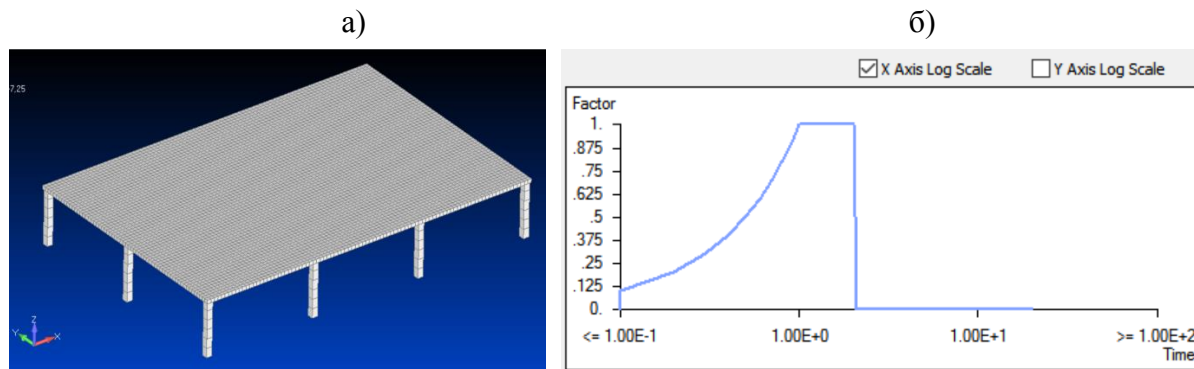


Рисунок 4 – Рассматриваемый объект (а), функция изменения удаляемой реакции во времени (б)

Динамический эффект оценивался с помощью формулы (3) и на основе оценки методом прямого интегрирования (ПИ) уравнений равновесия поврежденной системы. Результаты анализа представлены на рисунке 5, где крестиком обозначена колонна, для которой удаляется опора. При расчете конструкции на основе подхода ПИ учитывалась физическая и геометрическая нелинейность, при этом уровень деформаций в плите при устранении опорной связи колонны позволял судить о ее пластическом характере разрушения. Рисунок 5,а и 5,в иллюстрирует, что метод Г.А. Гениева дает определенный запас прочности, что позволяет его использовать при проектировании таких конструкций без использования развернутого аппарата динамики. При этом представляет интерес уровень динамического догружения колонн (рисунок 5,б и 5,г), где видно, что подход ПИ снижает уровень догружения на 25% по сравнению с оценкой по формуле (3).

По изгибающим моментам в плите при использовании подхода ПИ наблюдается также снижение коэффициента динамического догружения до уровня предельной несущей способности сечения. При этом максимальный коэффициент догружения, определяемый по формуле (3) для данной задачи составил 3,83. Использование прямого динамического метода показало, что для обеспечения недопущения локального разрушения этот коэффициент составляет 2,55.

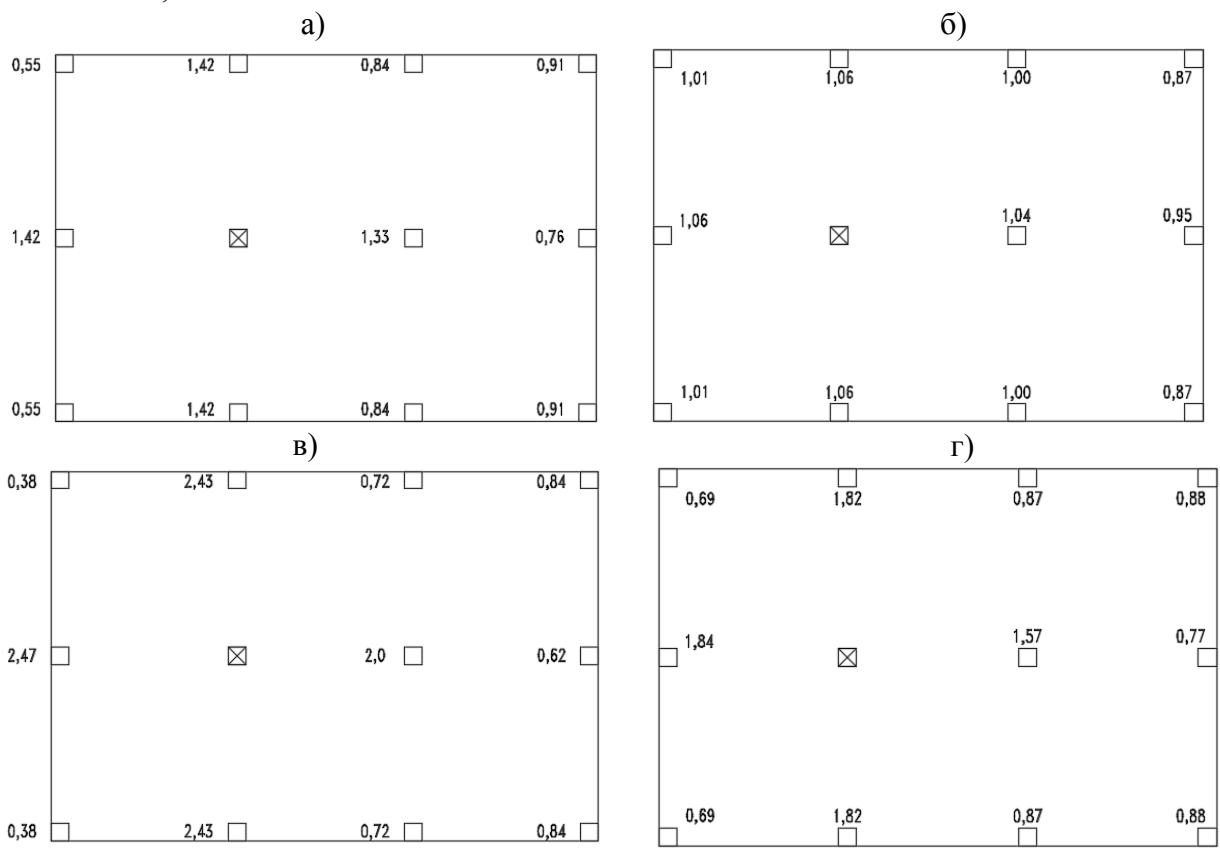


Рисунок 5 – Динамические эффекты для продольных усилий в колоннах, случай (А):
коэффициенты динамичности, полученные на основе усилий, вычисляемых по формуле (3) (а);
коэффициенты динамичности, вычисляемые путем (ПИ) (б); коэффициенты динамического догружения,
полученные на основе усилий по (3) (в); и путем (ПИ) (г)

Теперь рассмотрим случай (Б). Повреждение от продавливания задавалось для правой средней опоры, относительно удаляемой. Моделирование повреждений осуществлялось в соответствии со схемой рисунка 2,б. При этом сетка элементов в области опорного участка сгущалась. Мембранная жесткость пластинчатых элементов задавалась эквивалентной жесткости арматуры на растяжение, учитывалась арматура только в зоне повреждений. Расчет на устранение опоры при уровне нагрузки в $16,8 \text{ кН/м}^2$ привел к полному разрушению конструкции. Живучесть конструкции при наличии повреждений от продавливания удалось обеспечить при нагрузке в 10 кН/м^2 . При изменении коэффициента конструкционного демпфирования с 0,15 до 0,1 значение этой нагрузки уменьшилось до 9 кН/м^2 , что говорит о важнейшей роли демпфирования и необходимости экспериментальных исследований в этом направлении.

Результаты расчетов показали, что изменений динамического эффекта для продольных усилий в колоннах при наличии повреждений от продавливания по сравнению с целостной плитой практически нет. Отличия не превышают 5%. Приведем некоторые результаты по динамическим эффектам для изгибающих моментов с учетом повреждений от продавливания (рисунок 6). Здесь область повреждений от продавливания обозначена пунктирной линией. В скобках приведены значения коэффициентов, полученных без учета повреждений от продавливания.

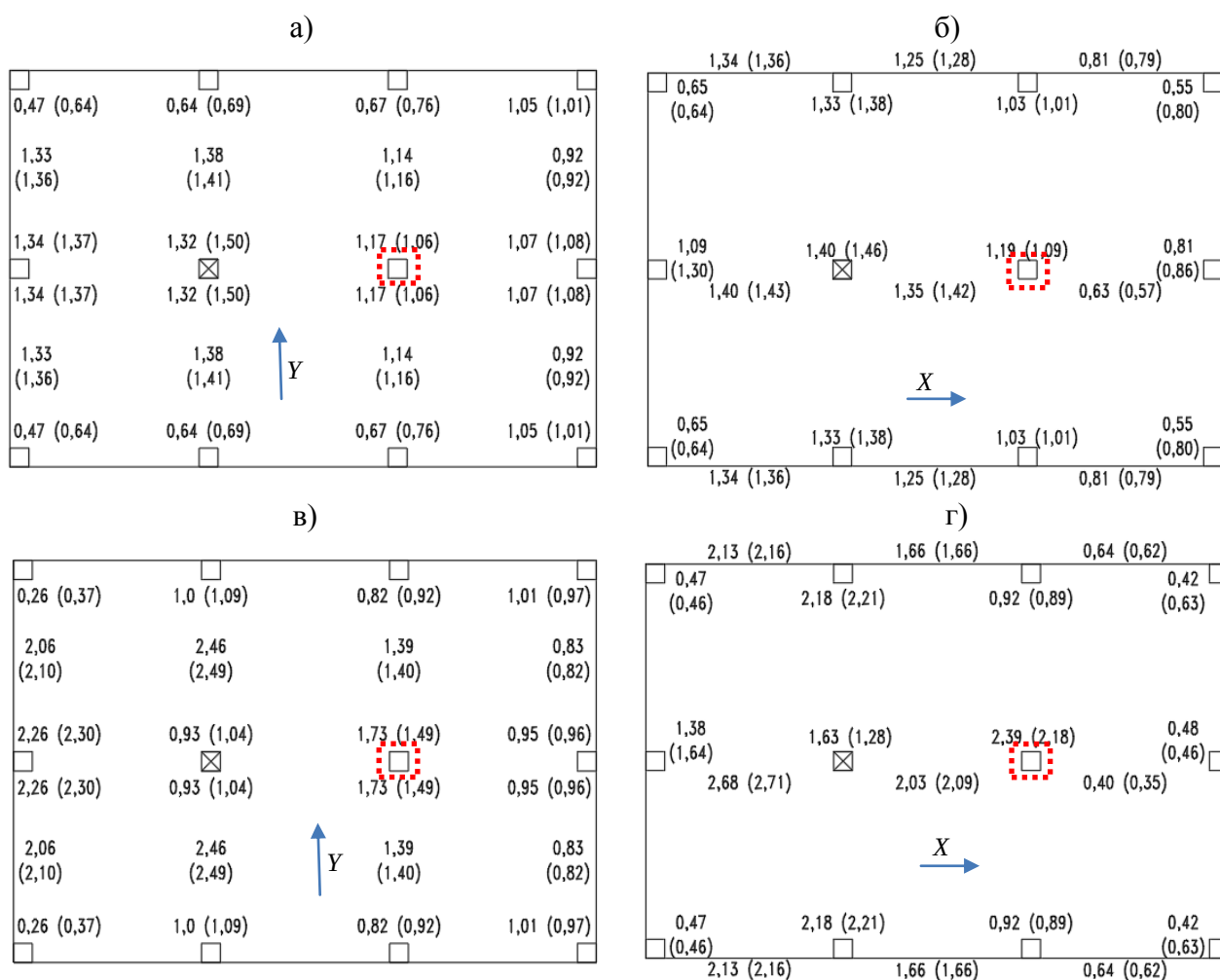


Рисунок 6 – Динамические эффекты для изгибающих моментов в плите, случай (Б): коэффициенты динамичности, полученные на основе момента M_u путем (ПИ) (а); то же для момента M_x (б); коэффициенты динамического догружения, полученные путем (ПИ) на основе моментов M_u (в); то же для момента M_x (г)

Как видно на рисунке 6, наличие повреждений от продавливания приводит к незначительному снижению коэффициента динамичности для фрагментов плиты, связанных с поврежденным участком и опорными участками на колонну для всех ячеек каркаса, включающих место повреждения. В пролетных частях плиты коэффициенты динамичности изменяются незначительно. Данная особенность может свидетельствовать о том, что при аварийных ситуациях, в которых расчетная схема конструкции не меняется, например, превышение эксплуатационной нагрузки, наличие этих повреждений не будет существенно сказываться на сопротивлении конструкции прогрессирующему разрушению.

Анализ динамического догружения конструкции при изменении расчетной схемы показал, что наличие повреждений от продавливания для рассматриваемой нами схемы приводит к увеличению догружения по моментам в местах локального устранения опоры и повреждение плиты от продавливания не более чем на 10%.

Дискуссия.

Процесс продавливания плит колоннами активно исследуется рядом ученых [6-8, 24, 25], и представляется сложным и малоизученным как с позиции теоретического обоснования, так и с позиции моделирования. Современные подходы к расчетам на продавливание, изложенные в нормативной литературе, нуждаются в совершенствовании. Рассмотренное исследование ставит ряд задач, необходимых для всестороннего подхода как

к моделированию поврежденных продавливанием безбалочных плит перекрытий, так и к учету их механической безопасности. В частности, представляется актуальным выявление наиболее опасного сочетания нагрузок для плит, поврежденных продавливанием при наличии на покрытии подвижной нагрузки, например, от автомобилей. Кроме того, открыт вопрос о влиянии числа и расположения мест повреждений от продавливания на сопротивляемость зданий и сооружений прогрессирующему разрушению при учете их пространственной работы. Также остаются актуальными вопросы оценки динамических эффектов в продольной арматуре и степени повреждений продавливанием, при которой живучесть конструкции при заданном уровне нагружения еще обеспечивается.

Выводы.

1. Представленная методика моделирования деформаций позволяет с удовлетворительной точностью выполнять анализ динамики железобетонных каркасов зданий с безбалочными перекрытиями и упрощенно моделировать повреждения от продавливания плит колоннами, при этом для приведенного сечения изгибная жесткость пластинчатых элементов уменьшается, а мембранная задается равной жесткости на растяжение арматуры, оказавшейся в зоне повреждений.

2. Установлено, что наличие повреждений от продавливания в узле соединения плиты и колонны при рассмотрении пространственной работы сооружения существенным образом влияет на его живучесть в случае, если аварийное динамическое догружение приводит к изменению (структурной перестройке) расчетной схемы и передает силовой поток через этот узел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения // Доступ из системы «Техэксперт» <http://docs.cntd.ru/document/551394640> (дата обращения 24.06.2021).
2. Шапиро Г.И., Эйсмэн Ю.А., Залесов А.С. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения // Доступ из системы «Техэксперт» <https://docs.cntd.ru/document/1200058272> (дата обращения 24.06.2021).
3. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. Москва, АСВ, 2014. 208 с.
4. Тамразян А.Г. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков и др., под общей ред. А.Г. Тамразяна. М.: Изд-во АСВ, 2012. 304 с.
5. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian journal of building construction and architecture 2017. №1. С. 6-14.
6. Тамразян А.Г. К анализу узла сопряжения монолитных плит и колонн при продавливании // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Под редакцией С.И. Меркулова. 2020. С. 101-109.
7. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам // Бетон и железобетон. 2012. №5. С. 10-16.
8. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771-778.
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 456 (2018) 012089
10. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. С. 04005.
11. Федорова Н.В., Ильющенко Т.А., Медянкин М.Д., Инсафутдинов А.Р. Особенности динамических догрузений железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и трещинообразовании // Строительство и реконструкция. 2019. № 2 (82). С. 72-80.
12. Федоров В.С., Меднов Е.А. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагружения на возникающий динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках // Строительство и реконструкция. 2010. № 6. С. 48.

13. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). С. 10214.
14. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). С. 10306.
15. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. С. 012002.
16. Бондаренко В.М., Ключева Н.В., Дегтярь А.Н., Андросова Н.Б. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных рамно-стержневых систем при внезапных структурных изменениях // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 4-16. С. 5-10.
17. Тамразян А.Г., Коновалова О.О. Оптимизация проектных параметров опертых по контуру монолитных перекрытий с использованием генетических алгоритмов // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Под редакцией С.И. Меркулова. 2020. С. 115-122.
18. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 7 (91). С. 3-15.
19. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Ковалев В.В. Критериальная оценка несущей способности сжато-изогнутых элементов реконструируемого железобетонного каркаса при аварийной расчетной ситуации // Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 71-80.
20. Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Моргунов М.В. К оценке живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельных элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 4. С. 40-44.
21. Моргунов М.В., Гришин П.А. Устойчивость железобетонных колонн в рамно-стержневых конструкциях при запроектных воздействиях // В книге: Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий. Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции: в 2 томах. Институт строительства и архитектуры НИУ МГСУ. 2019. С. 75-76.
22. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures Procedia Engineering (см. в книгах). 2016. Т. 153. С. 715-720.
23. Федоров В.С., Левитский В.Е., Соловьев И.А. Модель термосилового сопротивления железобетонных элементов стержневых конструкций // Строительство и реконструкция. 2015. № 5(61). С. 47-55.
24. M. Russell J.S. Owen I. Hajirasouliha Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // Engineering Structures 99 (2015) 28–41.
25. Marques M.G., Liberati, E.A. P., Gomes, R.B Punching shear strength model for reinforced concrete flat slabs with openings // Journal of structural engineering. 2021. №7 (147). No: 04021090

REFERENCES

1. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya // Dostup iz sistemy «Tekhekspert» <http://docs.cntd.ru/document/551394640> (data obrashcheniya 24.06.2021).
2. Shapiro G.I., Eysman YU.A., Zalesov A.S. Rekomendatsii po zashchite monolitnykh zhilykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya // Dostup iz sistemy «Tekhekspert» <https://docs.cntd.ru/document/1200058272> (data obrashcheniya 24.06.2021).
3. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh. Moskva: ASV, 2014. 208 s.
4. Tamrazyan A.G. Snizheniye riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoy i tekhnogennogo kharaktera / A.G. Tamrazyan, S.N. Bulgakov i dr., pod obshchey red. A.G. Tamrazyana. M.: Izd-vo ASV, 2012. 304 s.
5. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian journal of building construction and architecture 2017. №1. S. 6-14.
6. Tamrazyan A.G. K analizu uzla sopryazheniya monolitnykh plit i kolonn pri prodavlivanii // V sbor-nike: Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy. Pod redaktsiyey S.I. Merkulova. 2020. S. 101-109.
7. Karpenko N.I., S.N. Karpenko Prakticheskaya metodika rascheta zhelezobetonnykh plit na prodavlivaniye po razlichnym skhemam // Beton i zhelezobeton. 2012. №5. S. 10-16.
8. Trekin N.N., Krylov V.V. K voprosu o nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh plit na prodavlivaniye pri dinamicheskom nagruzhении na ob"yektakh nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury // Nauchnyy aspekt. 2018. Т. 7. № 4. S. 771-778.
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 456 (2018) 012089

10. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. S. 04005
11. Fedorova N.V., Il'yushchenko T.A., Medyankin M.D., Insaftudinov A.R. Osobennosti dinamicheskikh dogruzheniy zhelezobetonnykh elementov konstruktivnykh sistem pri gipoteticheskom udalenii odnoy iz nesu-shchikh konstruktivnykh i treshchinoobrazovaniy // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2019. № 2 (82). S. 72-80.
12. Fedorov V.S., Mednov Ye.A. Vliyaniye iskhodnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i urovnya nagruzheniya na voznikayushchiy dinamicheskiy effekt pri avariynom razrushenii opory v nerazrezykh stal'nykh balkakh // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2010. № 6. S. 48.
13. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmutter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the in-tegration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). S. 10214.
14. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). S. 10306.
15. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. S. 012002.
16. Bondarenko V.M., Klyuyeva N.V., Degtyar' A.N., Androsova N.B. Optimizatsiya zhivuchesti konstruktivno nelineynykh zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevnykh sistem pri vnezapnykh strukturnykh izmeneniyakh // Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport. 2007. № 4-16. S. 5-10.
17. Tamrazyan A.G., Konovalova O.O. Optimizatsiya proyektnykh parametrov opertykh po konturu monolitnykh perekrytiy s ispol'zovaniyem geneticheskikh algoritmov // V sbornike: Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy. Pod redaktsiyey S.I. Merku-lova. 2020. S. 115-122.
18. Alekseytsev A.V., Gaile L., Druks P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 7 (91). S. 3-15.
19. Savin S.YU., Kolchunov V.I., Kovalev V.V. Kriterial'naya otsenka nesushchey sposobnosti szhatykh elementov rekonstruiyemogo zhelezobonnogo karkasa pri avariynoy raschetnoy situatsii // Stroi-tel'stvo i rekonstruktsiya. 2020. № 1 (87). S. 71-80.
20. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Morgunov M.V. K otsenke zhivuchesti zhelezobetonnykh ram pri potere ustoychivosti otdel'nykh elementov // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktivnykh i sooruzheniy. 2007. № 4. S. 40-44.
21. Morgunov M.V., Grishin P.A. Ustoychivost' zhelezobetonnykh kolonn v ramno-sterzhnevnykh konstruktivnykh pri zaproyektnykh vozdeystviyakh // V knige: Funktsiya, konstruktivnyy, sreda v arkhitekture zdaniy. Sbornik tezisev dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh. Institut stroitel'stva i arkhitekturnykh NIU MGSU. 2019. S. 75-76.
22. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures Procedia Engineering (sm. v knigakh). 2016. T. 153. S. 715-720.
23. Fedorov V.S., Levitskiy V.Ye., Solov'yev I.A. Model' termosilovogo soprotivleniya zhelezobetonnykh elementov sterzhnevnykh konstruktivnykh // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2015. № 5 (61). S. 47-55.
24. M. Russell, J.S. Owen, I. Hajirasouliha Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // Engineering Structures 99 (2015) 28–41.
25. Marques M.G., Liberati, E.A. P., Gomes, R.B Punching shear strength model for reinforced concrete flat slabs with openings // Journal of structural engineering. 2021. №7 (147). No: 04021090.

Информация об авторах:

Алексеев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: aalexw@mail.ru

Антонов Михаил Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: mishany96969@mail.ru

Information about authors:

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete
and Stone Structures.

E-mail: aalexw@mail.ru

Antonov Mikhail D.

Moscow State University of Civil Engineering Moscow, Russia,
postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: mishany96969@mail.ru