

В.С. МОСКОВЦЕВА^{1,2}¹ НИУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОСОБОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Аннотация. Приведена практическая методика для определения параметра живучести железобетонного рамного каркаса многоэтажного здания со сложнапряженными элементами при статико-динамическом деформировании, вызванном особым воздействием и алгоритм численно-аналитической реализации этой методики. Значения параметрической нагрузки, при которой в наиболее напряженном пространственном сечении при рассматриваемом режиме нагружения наступает один из критериев особого предельного состояния, получены из решения системы канонических уравнений варианта смешанного метода. В соответствии с этим методом, решение задачи нелинейного деформирования рамной системы построено с использованием модели подконструкции рамной системы, описываемой шарнирно-стержневой моделью, в которой места возможного выключения связей заменяют сложными шарнирами, неизвестными угловыми и линейными связями. Предложенная методика расчета живучести железобетонных рам со сложнапряженными элементами удовлетворительно описывает процесс их деформирования и исчерпания несущей способности конструктивно нелинейной рамной системы при рассматриваемых особых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонная рама, сложное напряженное состояние, особое воздействие, расчетная модель, параметр живучести

V.S. MOSKOVITSEVA^{1,2}¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation² Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

CALCULATION OF ROBUSTNESS PARAMETER OF REINFORCED CONCRETE FRAME SYSTEM UNDER SPECIAL IMPACT

Abstract. A practical technique for determining the survivability parameter of reinforced concrete frame of a multi-storey building with complex-stressed elements under static-dynamic deformation caused by a special impact and an algorithm for numerical and analytical realization of this technique are presented. The values of parametric load, at which one of the criteria of special limit state occurs in the most stressed spatial section under the considered loading mode, are obtained from the solution of the system of canonical equations of the mixed method variant. In accordance with this method, the solution of the problem of nonlinear deformation of the frame system is constructed using the model of the substructure of the frame system described by the hinge-bar model, in which the places of possible disconnection of links are replaced by complex hinges, unknown angular and linear links. The proposed method of calculation of survivability of reinforced concrete frames with complex stressed elements satisfactorily describes the process of their deformation and exhaustion of bearing capacity of a structurally nonlinear frame system under the considered special impacts.

Keywords: reinforced concrete frame, complex stress state, special impact, calculation model, survivability parameter

1. Введение

На современном этапе развития научной деятельности в области безопасности строительных конструкций особое внимание уделяется исследованию методов защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Такая актуальная и стремительно развивающаяся область научного знания выходит на передний план строительной науки ввиду все увеличивающегося числа техногенных аварий, природных катастроф и актов терроризма. Определение «живучести» в известных отечественных [1, 2] и зарубежных [3, 4] публикациях рассматривается как способность конструктивной системы сохранять определенный уровень работоспособности при наличии повреждений, то есть перераспределять усилия между остальными элементами в случае выхода из строя или ослабления одного из них, продолжая выполнять свои основные функции, пусть и с некоторыми ограничениями. Внедрение в область строительной науки понятия живучести, подразумевающего сопротивление конструктивной системы повреждениям при особых воздействиях за счет пластических деформаций или специально спроектированных механизмов перераспределения в конструктивной системе силовых потоков, вызвано потребностью в комплексном подходе к исследованию конструкций жилых и промышленных объектов в запредельных состояниях. Обеспечение живучести сооружений представляет собой многогранную задачу, которая не поддается решению традиционными методами, комплексный анализ живучести требует использования не только численного моделирования, но и экспериментальных исследований. К настоящему времени в стране [5-7] и за рубежом [8-11] накоплены определенные результаты теоретических исследований по изучению сопротивления железобетонных конструкций в запредельных состояниях, вызванных особыми и аварийными воздействиями, в их числе и воздействиями, вызванными удалением несущего элемента или связи. Анализ выполненных экспериментальных исследований [12-17] отечественных и зарубежных ученых показал, что использование традиционных физических моделей, критериев предельных состояний железобетона и простейших видов напряженного состояния, без учета режимов нагружения конструкций не отражает особенности их статико-динамического деформирования и как правило приводит к снижению уровня механической безопасности, а в отдельных случаях и к значительно завышенному расходу материалов. Подобные исследования параметров живучести строительных конструкций, направленные на обеспечение защиты конструкций от прогрессирующего обрушения и их нормирование, сталкиваются с рядом новых научных проблем. Одна из сложностей заключается в учете поведения железобетонных рамных каркасов при сложнонапряженном состоянии в их несущих элементах. Существующие российские и зарубежные публикации, посвященные живучести и проблеме защиты от прогрессирующего обрушения конструктивных систем, практически не затрагивают вопросы расчета именно таких конструкций. В работе [18] предлагается вариант полуаналитического подхода к определению приращений динамических усилий в сложнонапряженных железобетонных элементах многоэтажных рам в запредельных состояниях, вызванных структурной перестройкой конструкции при особом воздействии. В связи с этим в настоящей статье предложена методика численно-аналитического расчета параметра живучести конструктивных систем каркасов многоэтажных зданий с ригелями, испытывающими сложное сопротивление изгиб с кручением и алгоритм реализации этой методики. В современных условиях, когда требования к безопасности и устойчивости к прогрессирующему обрушению становятся всё более строгими, разработка и реализация таких методик становится неотъемлемой частью проектирования и анализа строительных объектов.

2. Модели и методы

В соответствии с принятым определением термина «живучесть», которое связывается с изменением степени статической неопределенности рамной системы, а также с ее геометрической изменяемостью, количественно оценить такие структурные изменения предлагается с применением параметра живучести λ . Количественно этот параметр равен значению параметрической нагрузки при которой в конструктивной статически неопределимой рамной системе начинаются структурные преобразования в виде возникновения пластического шарнира и по мере увеличения этой нагрузки и появления новых пластических шарниров конструктивная система превращается в изменяемую.

Для расчета параметра живучести применяется двухуровневая первичная и вторичная расчетная схема, позволяющая оценивать сопротивляемость конструкции прогрессирующему обрушению. Расчет по первичной расчетной схеме осуществляется численным методом с использованием современных программных комплексов для всей рамной конструктивной системы (рисунок 1а). На втором уровне, с использованием вторичной расчетной схемы, рассматривается подконструкция, определяемая зоной возможного локального разрушения, которая, в соответствии с нормами [19], ограничивается пролетом ригелей, примыкающих к колонне, подверженной особому воздействию (рисунок 1б). Для рассматриваемого рамного каркаса здания эта подконструкция представляется моделью в виде стержневого полигона (рисунок 1б). Зоны возможного образования пластических шарниров в стержневом полигоне обозначены номерами ($k=1,2,3\dots$). Расположение этих зон определяется сечениями, где в бетоне и арматуре при увеличении на конструкцию параметрической нагрузки (λP) и соответственно внутренних усилий - крутящего и изгибающего моментов, в подконструкции могут достигаться предельные усилия и образовываться пластические шарниры. Предварительно выбор этих зон не представляет сложности. Они назначаются в узлах пересечения элементов, в точках приложения сосредоточенных сил, в местах резкого изменения сечений и жесткостей элементов. Для определения неизвестных усилий исследуемой подконструкции используется вариант смешанного метода строительной механики [20].

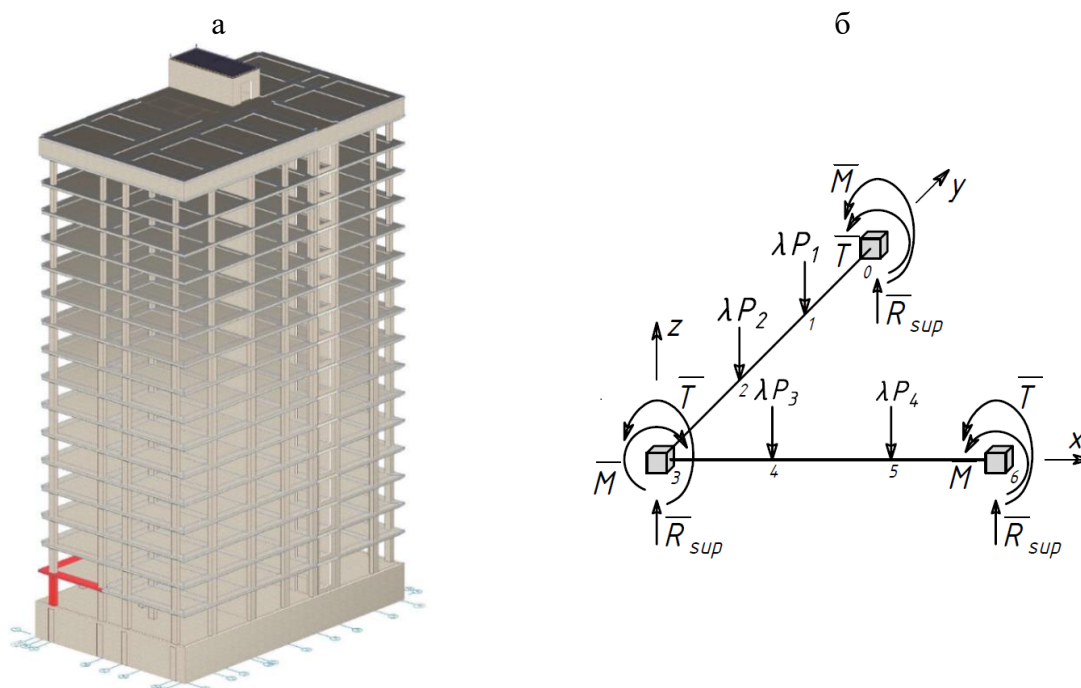


Рисунок 1 – Расчетная схема каркаса здания (а) и расчетная схема подконструкции в зоне локального разрушения пространственной рамной системы (б)

Согласно [20], начальная система канонических уравнений в матричной форме формируется в виде:

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

Коэффициенты канонических уравнений δ_{ij} и δ'_{ij} вычисляются после построения единичных эпюр моментов путем их перемножения в соответствии с правилами строительной механики:

$$\delta_{ij} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_j}{EI} dx = \sum \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_j}{EI} \quad (2)$$

Коэффициенты Δ_{ip} определяются подобным образом, перемножая соответствующие грузовые эпюры, построенные от внешних сил:

$$\Delta_{ip} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot M_p}{EI} dx = \sum \frac{\bar{M}_i \cdot M_p}{EI} \quad (3)$$

Построение эпюры моментов от внешней параметрической нагрузки λ используется в нахождении грузовых коэффициентов δ_{ip} , ее перемножением с единичной эпюрой моментов. Далее с использованием выражения (4) и эпюры единичных моментов получаем эпюру поперечных сил Q .

$$Q_{k-k+1} = \frac{M_{np} - M_l}{l} \quad (4)$$

Затем необходимые реакции r'_{ij} (из эпюр единичных моментов), R_{jp} (из эпюр моментов от внешних сил), r_{ip} (из эпюр моментов от внешней параметрической нагрузки λ) определяются методом сечений.

Принимая в расчет свойства канонических уравнений и опираясь на исходную систему в матричной форме (1), производится ее преобразование:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\Delta}_q \\ \bar{R}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{r}_p \end{bmatrix} \cdot \lambda = 0 \quad (5)$$

Ее решение, выполняемое с применением Mathcad имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{M}_q \\ \bar{Z}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{m}_p \\ \bar{z}_p \end{bmatrix} \cdot \lambda, \quad (6)$$

где

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_q \\ \bar{Z}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\Delta}_q \\ \bar{R}_q \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \bar{m}_p \\ \bar{z}_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{r}_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

Учитывая суммарное действие заданной нагрузки и параметрической по формуле (8), определяются моменты в выключающихся связях подконструкции рамы:

$$M_j = M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda, \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (8)$$

где M_{jq} и m_{jp} - элементы матрицы столбцов \bar{M}_q и \bar{m}_p

Образование пластического шарнира в сечении C_j наиболее напряженного элемента подконструкции определяется приложенным уровнем параметрической нагрузки $\lambda_m, (m = 1, 2, 3)$. Значение этой нагрузки определяется следующим критерием:

$$\lambda_m = \min \left(\frac{M_{j,ult}^d \pm |M_{jq}^d|}{m_{jp}^d} \right), \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (9)$$

Если в каком-либо сечении подконструкции динамический момент достигает предельного значения, в этом сечении образуется пластический шарнир, статическая неопределимость подконструкции уменьшается на единицу и тогда в исходную систему уравнений (1) вносятся изменения: в матрице **A** вычеркивают j-ую строку и j-ый столбец, в матрице **B** - удаляется j-ая строка. При этом, соответственно, должны быть скорректированы и грузовые коэффициенты $\bar{\Delta}_q$ и \vec{R}_q следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{iq}^{(l)} &= \Delta_{iq} + \delta_{ip} \cdot \lambda_m + \delta_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d) \\ R_{iq}^{(l)} &= R_{iq} + r_{ip} \cdot \lambda_m + r_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Находим приращение параметрической нагрузки по завершении преобразования системы определяющих уравнений, где полученная на предыдущем этапе станет исходной системой.

$$\lambda_{mi} = \lambda_{m,i-1} + \Delta_{m,i-1} \quad (11)$$

Исходя из представленной методики осуществляется численный процесс формирования шарниров в пластической стадии деформирования. Блок-схема рисунка 2 отражает описанный алгоритм для определения параметрической нагрузки, позволяющий пошагово оценивать состояние конструкции, включая формирование исходных данных, процесс корректировки жесткостей конструктивной системы и структурных изменений в конструкции. На каждом этапе нагружения вычисляются минимальные значения параметрической нагрузки, позволяющие выявить наиболее напряженные сечения, подверженные образованию пространственных пластических шарниров. Это позволяет на каждом этапе нагружения оценить запас живучести железобетонной рамной системы, а также вычислять относительные значения параметра живучести, т.е. отношение параметрической нагрузки на заданном уровне статического нагружения к максимальному ее значению.

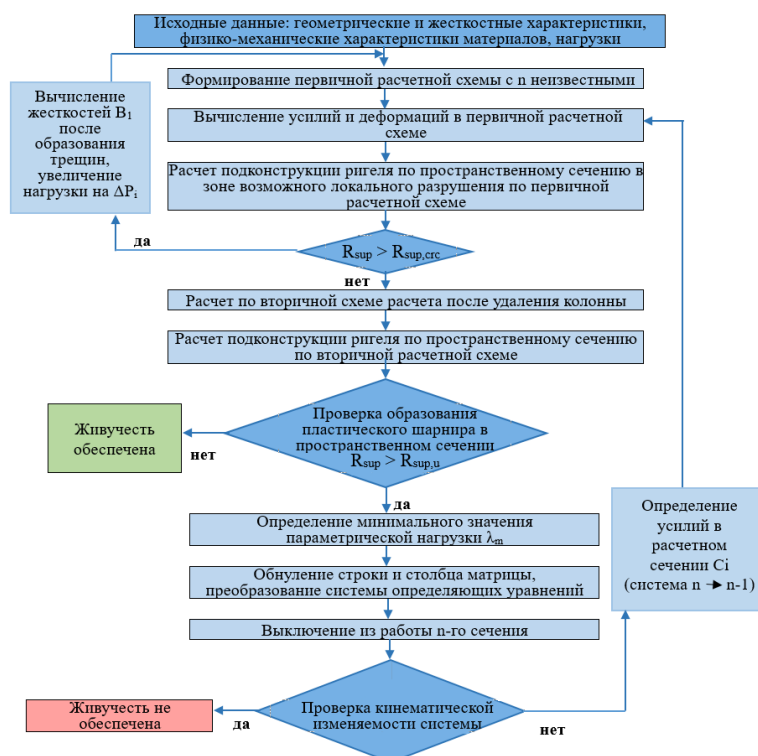


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма итерационного расчета живучести железобетонной рамы со сложнапряженными элементами

В качестве примера реализации представленного алгоритма приведен численный расчет по определению параметра живучести для отдельного элемента плоского каркаса – подконструкции ригеля, нагруженного двумя сосредоточенными силами в третях пролета (рисунок 3). Исходные характеристики, принятые в расчете: бетон В15, $l = 0,9\text{ м}$, $0,1 \times 0,1\text{ м}$, $I = 8,33 \cdot 10^{-6}\text{ м}^4$, $E_b = 2,3 \cdot 10^7\text{ кН / м}^2$, $M_{np} = 1,8\text{ кНм}$.

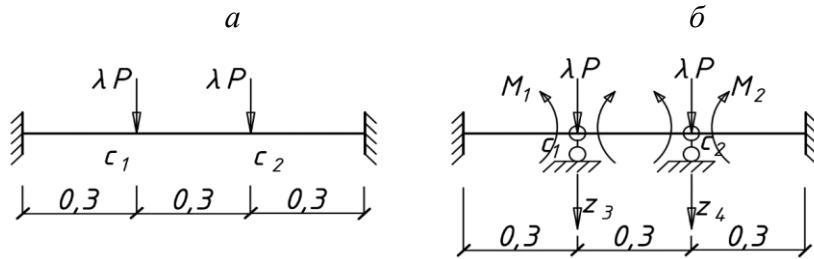


Рисунок 3 – Заданная (а) и основная (б) системы смешанного метода при определении параметра живучести λ

Развернутый вид системы канонических уравнений с грузовыми коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}M_1 + \delta_{12}M_2 + \delta_{13}z_3 + \delta_{14}z_4 + \Delta_{1p} + \delta_{1p}\lambda_p &= 0 \\ \delta_{21}M_1 + \delta_{22}M_2 + \delta_{23}z_3 + \delta_{24}z_4 + \Delta_{2p} + \delta_{2p}\lambda_p &= 0 \\ r'_{31}M_1 + r'_{32}M_2 + r'_{33}z_3 + r'_{34}z_4 + R_{3p} + r_{3p}\lambda_p &= 0 \\ r'_{41}M_1 + r'_{42}M_2 + r'_{43}z_3 + r'_{44}z_4 + R_{4p} + r_{4p}\lambda_p &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Коэффициенты δ_{ji} канонических уравнений (12) можно найти путем перемножения соответствующих единичных эпюр (рисунок 4).

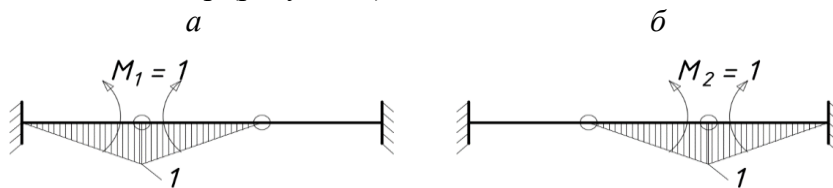


Рисунок 4 – Единичные эпюры, построенные в основной системе смешанного метода от момента M_1 (а) и M_2 (б)

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} \cdot 2(0 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 1 \cdot 1) = \frac{0,6}{3EI}; \\ \delta_{12} = \delta_{21} &= \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_2}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (1 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 0 \cdot 1) = \frac{0,3}{6EI}; \\ \delta_{22} &= \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot \bar{M}_2}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} \cdot 2(0 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 1 \cdot 1) = \frac{0,6}{3EI}. \end{aligned}$$

С применением способа вырезания узлов для c_1 и c_2 , вычисляются коэффициенты r_{ji} используя значения поперечных сил, вызванных единичными моментами M_1 и M_2 (рисунок 5).

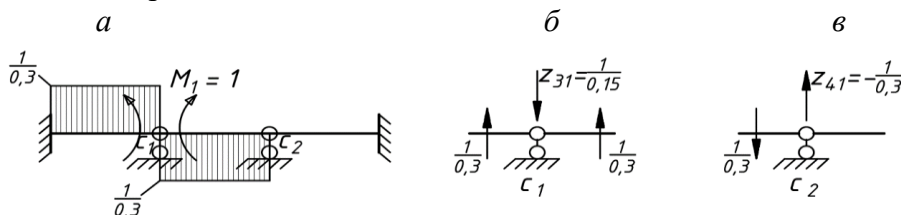


Рисунок 5 – Эпюра Q в основной системе от единичного момента M_1 (а) и схемы усилий в узлах c_1 (б) и c_2 (в)

$$Q_{0-1} = \frac{M_{np} - M_{\pi}}{l} = \frac{1}{0,3}; \quad Q_{1-2} = \frac{M_{np} - M_{\pi}}{l} = -\frac{1}{0,3}$$

$$r_{31} = \frac{1}{0,15}; \quad r_{41} = -\frac{1}{0,3}$$

Подобным способом найдены значения коэффициентов: $r_{32} = -\frac{1}{0,3}; \quad r_{42} = \frac{1}{0,15}$

Построив эпюры моментов от параметрической нагрузки λP и внешних сил $P=2,6\text{кН}$ (рисунок 6), можно определить значения грузовых коэффициентов Δ_{ip} и R_{ip}

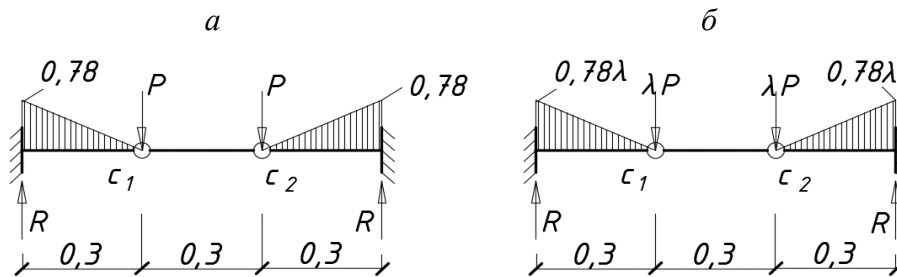


Рисунок 6 – Эпюры моментов M_P в основной системе смешанного метода от заданной нагрузки (а) и внешней параметрической нагрузки (б)

$$\Delta_{1P} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39 + 1 \cdot 0) = \frac{0,234}{6EI};$$

$$\Delta_{2P} = \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39 + 1 \cdot 0) = \frac{0,234}{6EI};$$

$$R_{3P}=2,6; \quad R_{4P}=2,6.$$

$$\delta_{1P} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78\lambda + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39\lambda + 1 \cdot 0) = \frac{0,234\lambda}{6EI};$$

$$\delta_{2P} = \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78\lambda + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39\lambda + 1 \cdot 0) = \frac{0,234\lambda}{6EI};$$

$$r_{3P} = \lambda; \quad r_{4P} = \lambda.$$

Система канонических уравнений в матричной форме представлена следующим образом:

$$\begin{cases} A \cdot M + B \cdot Z + \Delta_q + \delta_P \cdot \lambda = 0 \\ C \cdot M + 0 + R_q + r_P \cdot \lambda = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Подставляя числовые значения в матрицы коэффициентов системы уравнений (13) для рассматриваемой подконструкции ригеля рамы получены:

- коэффициенты при неизвестных А, В, С:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{0,6}{3EI} & \frac{0,3}{6EI} \\ \frac{0,3}{6EI} & \frac{0,6}{3EI} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{0,15} & -\frac{1}{0,3} \\ -\frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,15} \end{bmatrix}; \quad C = -B^T \quad (14)$$

- грузовые коэффициенты $\Delta_P, R_P, \delta_P, r_P$

$$\Delta_P = \begin{bmatrix} 0,234 \\ \frac{6EI}{0,234} \\ \frac{6EI}{0,234} \end{bmatrix}; \quad R_P = \begin{bmatrix} 2,6 \\ 2,6 \end{bmatrix}; \quad \delta_P = \begin{bmatrix} 0,234\lambda \\ \frac{6EI}{0,234\lambda} \\ \frac{6EI}{0,234\lambda} \end{bmatrix}; \quad r_P = \begin{bmatrix} \lambda \\ \lambda \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Решая матричное уравнение (15)

$$\left\| \begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_P \\ R_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_P \\ r_P \end{bmatrix} \right\| \cdot \lambda = 0, \quad (16)$$

получим:

$$\left\| \begin{bmatrix} \vec{M} \\ \vec{Z} \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{bmatrix} \right\| + \left\| \begin{bmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{bmatrix} \right\| \cdot \lambda, \quad (17)$$

$$\text{где} \quad \left\| \begin{bmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{bmatrix} \right\| = - \left\| \begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\Delta}_P \\ \vec{R}_P \end{bmatrix} \right\|; \quad \left\| \begin{bmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{bmatrix} \right\| = - \left\| \begin{bmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\delta}_P \\ \vec{r}_P \end{bmatrix} \right\|. \quad (18)$$

Численное решение уравнений (18) в программе Mathcad:

$$\left\| \begin{bmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{bmatrix} \right\| = - \begin{bmatrix} \frac{0,6}{3EI} & \frac{0,3}{6EI} & \frac{1}{0,15} & -\frac{1}{0,3} \\ \frac{0,3}{6EI} & \frac{0,6}{3EI} & -\frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,15} \\ -\frac{1}{0,15} & \frac{1}{0,3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{0,3} & -\frac{1}{0,15} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{0,234}{6EI} \\ \frac{0,234}{6EI} \\ \frac{0,234}{6EI} \\ 2,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,779999999900 \\ 0,779999999900 \\ -280,912364799 \\ -280,912364799 \end{bmatrix}$$

$$\left\| \begin{bmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{bmatrix} \right\| = - \begin{bmatrix} \frac{0,6}{3EI} & \frac{0,3}{6EI} & \frac{1}{0,15} & -\frac{1}{0,3} \\ \frac{0,3}{6EI} & \frac{0,6}{3EI} & -\frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,15} \\ -\frac{1}{0,15} & \frac{1}{0,3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{0,3} & -\frac{1}{0,15} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{0,234\lambda}{6EI} \\ \frac{0,234\lambda}{6EI} \\ \frac{0,234\lambda}{6EI} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3000000000\lambda \\ 0,3000000000\lambda \\ -136,8547419\lambda \\ -136,8547419\lambda \end{bmatrix}$$

Получаем решение уравнения (17) в программе Mathcad в численном виде, подставив сформированные матрицы:

$$\left\| \begin{bmatrix} \vec{M} \\ \vec{Z} \end{bmatrix} \right\| = \begin{bmatrix} 0,779999999900 \\ 0,779999999900 \\ -280,912364799 \\ -280,912364799 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,3000000000\lambda \\ 0,3000000000\lambda \\ -136,8547419\lambda \\ -136,8547419\lambda \end{bmatrix} \cdot \lambda \rightarrow$$

$$M_{np} = \begin{bmatrix} 0,7799 + 0,3\lambda^2 \\ 0,7799 + 0,3\lambda^2 \\ -280,9 - 136,85\lambda^2 \\ -280,9 - 136,85\lambda^2 \end{bmatrix} = 1,8 \text{ кНм}$$

Для сечения с₁: $\lambda_1 = \begin{pmatrix} 1,44 \\ -1,44 \end{pmatrix}$

Параметр λ_2 определяется аналогично при увеличении значения статической нагрузки на первом этапе статико-динамического нагружения и повторения описанных процедур.

Критерием живучести рассматриваемой конструкции служит постепенное изменение параметра нагрузки λ_m , ($m=1,2,3$) от образования пластических шарниров и уменьшения статической неопределенности конструкции. Этап расчета, когда определитель матрицы системы уравнений становится равным нулю, свидетельствует о том, что исследуемая конструктивная система не может воспринимать нагрузки и становится изменяемой. Такое состояние конструктивной системы указывает на исчерпание ее живучести.

3. Результаты исследования и их анализ

Из результатов расчета (рисунок 7) получено первоначальное появление пространственных пластических шарниров в сечениях C_0 и C_1 при параметрической нагрузке $\lambda_1 = 1,44$. При дальнейшем ее увеличении ($\lambda_2 = 1,84$) возникают последующие шарниры в пластической стадии деформирования в сечениях C_2 и C_3 , что приводит к геометрической изменяемости рассматриваемой конструкции и ее разрушению.

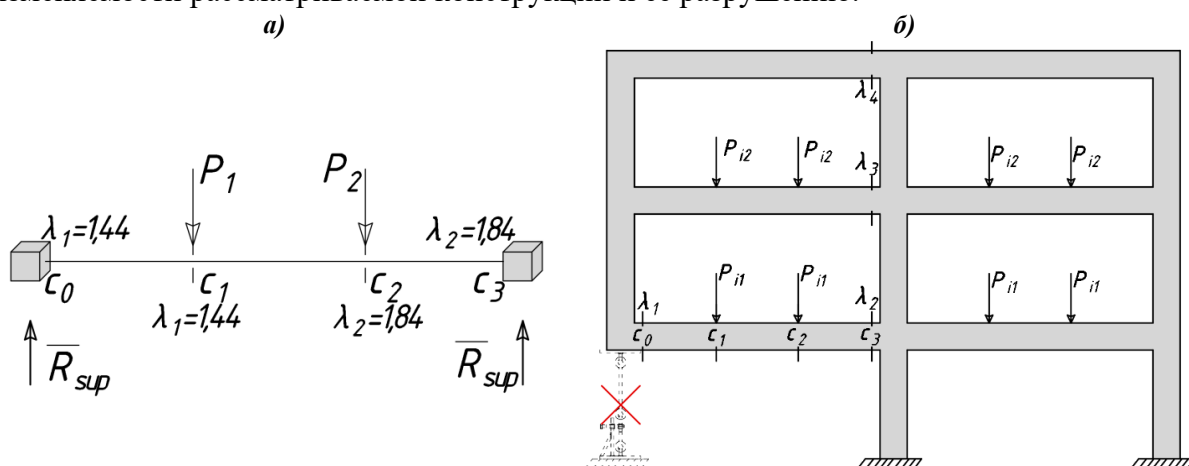


Рисунок 7 – Расчетное значение параметра живучести для подконструкции рамы (а) и последовательность выключения сечений ригеля при увеличении параметрической нагрузки (б), где λ_m ($m=1, 2, 3$) – последовательность образования пространственных пластических шарниров

На рисунке 8 показан дискретно изменяющийся график параметрической нагрузки (λ), который позволяет видеть процесс изменения статической неопределенности подконструкции рамной системы в процессе увеличения уровня прикладываемой статической нагрузки на первом этапе ее статико-динамического нагружения.

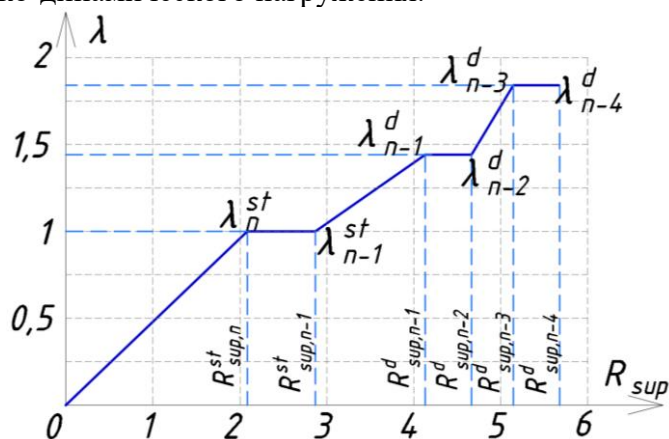


Рисунок 8 – Изменение параметрической нагрузки λ при образовании пластических шарниров в зависимости от уровня статической нагрузки на первом этапе нагружения подконструкции

Остаточный ресурс работоспособности конструктивной системы удобно анализировать, используя относительное значение рассматриваемого параметра живучести

λ/λ_{\max} . График в координатах « $\lambda/\lambda_{\max} - G/G_u$ » (рисунок 9) демонстрирует изменение этого параметра по мере образования в конструкции шарниров в пластической стадии деформирования.

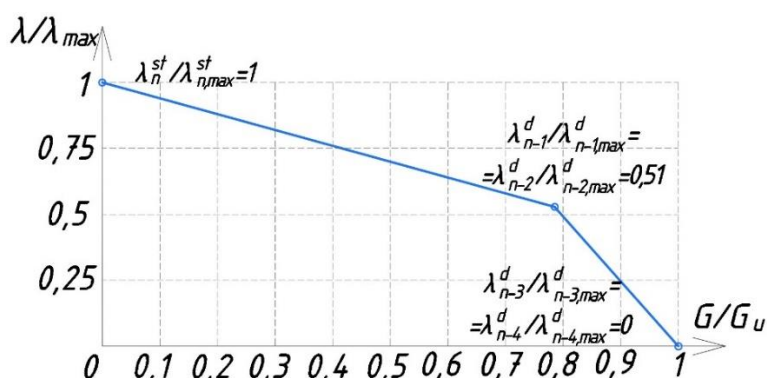


Рисунок 9 – График изменения относительного значения параметра живучести λ/λ_{\max} .

Значение $\lambda/\lambda_{\max}=1$, соответствует исходной статической неопределимости рамы, а относительный параметр живучести $\lambda/\lambda_{\max}=0$ соответствует изменяемой конструкции рамы. Промежуточные значения рассматриваемого параметра λ/λ_{\max} определяются в зависимости от количества образовавшихся пластических шарниров.

4. Заключение

1. На основе смешанного метода строительной механики для железобетонных статически неопределимых рам построены расчетная модель, методика и алгоритм расчета параметра живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий с ригелями, испытывающими сложное сопротивление, при режимном статико-динамическом нагружении.
2. Показано, что параметр живучести рамной системы зависит от значения статической нагрузки, прикладываемой на первом этапе нагружения, степени статической неопределимости конструкции, жесткостных параметров на разных этапах нагружения и вида напряженного состояния в ее элементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С. 28-31
2. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с
3. Lorengo M., Ma J. Development of complementary structural robustness metrics based on failure-induced stress redistribution // Engineering Structures, 2022. Vol. 266. P. 114555
4. Gan Y., Chen J., Xiang M. PDEM-based reliability assessment of RC frames against progressive collapse considering initial local failure // Journal of Building Engineering, 2023. Vol. 76. P. 107198.
5. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 74-84.
6. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18, № 4. P. 111–123.
7. Тамразян А.Г., Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. №. 7. С. 22-28

8. Zhao R., Chen G., Zhang Z., Luo W. Progressive Collapse Resistance Assessment of a Multi-Column Frame Tube Structure with an Assembled Truss Beam Composite Floor under Different Column Removal Conditions // *Buildings*, 2024. Vol. 14. P. 111. <https://doi.org/10.3390/buildings14010111>
9. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // *Buildings*, 2023. Vol. 13. P. 533. <https://doi.org/10.3390/buildings13020533>
10. Alshaikh I.M.H., Abadel A.A., Sennah K., Nehdi M.L., Tuladhar R., Alamri M. Progressive Collapse Resistance of RC Beam-Slab Substructures Made with Rubberized Concrete // *Buildings*, 2022. Vol. 12. P. 1724. <https://doi.org/10.3390/buildings12101724>
11. Fialko S.Y., Kabantsev O. V., Perelmutter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102, № 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
12. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1090 (2021) P.012135
13. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Pp.032037.
14. Федорова Н.В., Гуок Ф.Д., Чанг Н.Т. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2020. №1 (87). С.92–100.
15. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 643 (2021) P. 012163
16. Prakash M., Satyanarayanan K.S. Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete frames under a corner column removal scenario // *4th International Conference on Recent Advances in Material Chemistry*, 2021. Vol. 40. P.S69-S74
17. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. – Т. 2020.
18. Федорова Н.В., Московцева В.С., Амелина М.А., Демьянов А.И. Определение динамических усилий в сложноподвижных элементах железобетонных рам при особом воздействии // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. № 2 (770). С. 5-15.
19. СП 385.1325800.2018 "Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения"
20. Милейковский И.Е., Колчунов В.И. Неординарный смешанный метод расчета рамных систем с элементами сплошного и составного сечений // *Известия ВУЗов. Строительство*. 1995. № 7–8. С.32–37.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Koncepciya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdejstviyah [The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under force and environmental influences]. *Industrial and Civil engineering*. 2013. No.2. Pp. 28-31. (rus).
2. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdejstviyah. [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow: ACB, 2014. 208 p. (rus).
3. Lorengo M., Ma J. Development of complementary structural robustness metrics based on failure-induced stress redistribution // *Engineering Structures*, 2022. Vol. 266. P. 114555
4. Gan Y., Chen J., Xiang M. PDEM-based reliability assessment of RC frames against progressive collapse considering initial local failure // *Journal of Building Engineering*, 2023. Vol. 76. P. 107198
5. Il'yushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Treshchinostojkost' prednapryazhennyh zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstrukcij pri osobyh vozdejstviyah [Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-core structures under special influences]. *Building and Reconstruction*. 2021. No.1(93). Pp. 74-84. (rus).
6. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18, No.4. Pp. 111–123.
7. Tamrazyan A.G., ZHivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstrukcij pri povrezhdenii [Survivability as a degree of operability of structures in case of damage]. *Industrial and Civil engineering*. 2023. No.7. Pp. 22-28. (rus).
8. Zhao R., Chen G., Zhang Z., Luo W. Progressive Collapse Resistance Assessment of a Multi-Column Frame Tube Structure with an Assembled Truss Beam Composite Floor under Different Column Removal Conditions // *Buildings*, 2024. Vol. 14. P. 111. <https://doi.org/10.3390/buildings14010111>
9. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // *Buildings*, 2023. Vol. 13. P. 533. <https://doi.org/10.3390/buildings13020533>

10. Alshaikh I.M.H., Abadel A.A., Sennah K., Nehdi M.L., Tuladhar R., Alamri M. Progressive Collapse Resistance of RC Beam–Slab Substructures Made with Rubberized Concrete // *Buildings*, 2022. Vol. 12. P. 1724. <https://doi.org/10.3390/buildings12101724>
11. Fialko S.Y., Kabantsev O. V., Perelmutter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102, № 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
12. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1090 (2021) P.012135
13. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Pp.032037.
14. Fedorova N.V., Guok F.D., CHang N.T. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnyh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement]. *Building and Reconstruction*. 2020. No.1 (87). Pp. 92–100. (rus).
15. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 643 (2021) P. 012163
16. Prakash M., Satyanarayanan K.S. Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete frames under a corner column removal scenario // *4th International Conference on Recent Advances in Material Chemistry*, 2021. Vol. 40. P.S69-S74
17. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020.
18. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Amelina M.A., Demyanov A.I. Opredelenie dinamicheskikh usilij v slozhnonapryazhennyh elementah zhelezobetonnyh ram pri osobom vozejstvii [Determination of dynamic forces in complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2023. No. 2. Pp. 5-15. (rus).
19. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravilaproektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions]. M.: Standartinform, 2018. P. 19 (rus)
20. Milejkovskij I.E., Kolchunov V.I. Neordinarnyj smeshannyj metod rascheta ramnyh sistem s elementami sploshnogo i sostavnogo sechenij [An extraordinary mixed method for calculating frame systems with elements of continuous and composite sections]. *News of higher educational institutions. Construction*. 1995. No.7–8. Pp. 32–37. (rus).

Информация об авторах:

Московцева Виолетта Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доцент кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, к.т.н.
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
инженер.
E-mail: lyavetka1@mail.ru

Information about authors:

Moskovtseva Violetta S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia,
lecturer of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.
Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences
engineer.
E-mail: lyavetka1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 12.09.2025

The article was submitted 17.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 12.09.2025