

Н.С. КУРЧЕНКО¹, С.Ю. САВИН¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТАЛЬНЫЕ РАМЫ ЗДАНИЙ ПРИ ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ

Аннотация. Статья посвящена актуальной в настоящее время проблематике оценки живучести стальных рамных конструктивных систем на деформируемом основании в условиях случайных ударных воздействий. Для таких воздействий заранее не определены точка приложения, направление и интенсивность. Полагается, что для существующего проектного решения возникновение таких воздействий не должно приводить к прогрессирующему обрушению. Выполнен ряд расчетов в квазистатической постановке для выявления наиболее опасных случайных воздействий, а затем произведен проверочный расчет в динамической постановке. Расчет в квазистатической постановке выполняется на основе моделей деформационной теории пластичности, а расчет в динамической постановке с учетом ассоциированного закона течения стали. Ударная нагрузка представляется в виде импульса силы, статически эквивалентной динамическому воздействию от неупругого удара жестким телом по конструктивной системе. Предложенные процедуры позволяют проектировать стальные рамные конструкции, устойчивые к случайным аварийным ударным воздействиям.

Ключевые слова: риск аварии, численное моделирование, стальные рамы, колонны, конечно элементный анализ, динамическое догружение, ударное воздействие, импульс, безопасность.

N.S. KURCHENKO¹, S.YU. SAVIN¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

MODELING OF IMPACTS ON STEEL FRAMES OF BUILDINGS ON A DEFORMABLE SOIL BASE

Abstract. The article focuses on the currently relevant problem of assessing the safety of steel frame systems on a deformable soil base under accidental impacts. The article considers a case when impact actions can be random, i.e., such parameters as application point, direction and intensity of impact are not determined preliminarily. It is supposed that for the existing design solution the occurrence of such impacts should not lead to progressive collapse, and the structure as a whole should have the property of robustness. In order to estimate this property, it is suggested to carry out a number of calculations for the stress-strain state under the most dangerous random loads and then to carry out a verification analysis in the dynamic statement. For the steel frame, a search problem is solved according to the criterion of minimization of integral safety margin of structural elements. The calculations account for the possibility to prevent the frame buckling. The quasi-static analysis is performed on the basis of the models of the deformation theory of plasticity, and the dynamic analysis is done with regard to the associated law of steel yielding. The proposed procedures allow designing steel frame structures which are resistant to random accidental loads. A shock load is represented in the form of a force impulse which is statically equivalent to the dynamic effect of an inelastic impact of a rigid body on a structural system. An example of design and performance evaluation of a steel frame structure of a two-story building is considered.

Keywords: accident risk, numerical simulation, steel frames, columns, finite element analysis, dynamic loading, impact, impulse, safety.

Введение

Проблема расчета и проектирования стальных каркасов зданий с учетом особых воздействий в настоящее время является актуальной. Различные её аспекты вызывают интерес многих исследователей [1–7]. При этом особые воздействия на несущие системы зданий и сооружений условно можно разделяются на нормируемые [8–10], для которых изначально задана интенсивность и участок приложения, и ненормируемые, применительно к которым используется ситуационный подход [11–13]. Несмотря на то, что особые воздействия, относящиеся к нормируемым, и прежде всего связанные с ударами, могут вызывать повреждение или разрушение конструкций, их влияние на начальное напряженно-деформированное состояния элементов несущей системы при анализе её сопротивляемости прогрессирующему обрушению в действующих нормах на проектирование, таких как СП 385.132580 [13], UFC 4-023-03 [11] или GSA 2013 [12], практически не учитывается.

По мнению Kiakojoougi и др. [14] принятый в действующих нормах ситуационный подход, состоящий в исключении из расчетной схемы одного из несущих элементов системы, плохо подходит к анализу устойчивости к прогрессирующему обрушению при взрывных воздействиях, поскольку при реальных взрывах (см. например, [15]) как правило оказываются поврежденными более одного несущего элемента. В статье [16] для крайних колонн стальных рам была рассмотрена возможность столкновения с ними легкового или грузового автомобиля. На основе анализа расчетных ситуаций, связанных с различными ударными воздействиями, была сформирована история нагружений и оценивалась вероятность разрушения каркаса здания при приложении ударной силы от автомобиля. Оценка воздействия удара от автомобиля [17], вызывающего прогрессирующее обрушение стального каркаса здания выполнялась следующими способами: подбором параметров ударного воздействия, с помощью уравнения удара, когда выполнялся нелинейный динамический расчет без удаления колонны, а также удара с последующим удалением колонны. Последний подход является наиболее реалистичным и одновременно наиболее неблагоприятным для конструкции с позиции деформирования и количества образующихся пластических шарниров. Авторами работы рассматривается оптимизация [18] конструкций при таких нагрузках. В качестве критерия оптимальности рассматривается сопротивляемость конструкции аварийным воздействиям. Исследуется возможность решения этой задачи на основе генетических алгоритмов, PSO и других методов.

Важным фактором, влияющим на несущую способность элементов стальных конструкций, является сопротивление смятию отдельных элементов [19], такой эффект может проявляться при несовершенствах геометрии и неточностях монтажа и повлиять на несущую способность при динамических нагрузках. Особенно такие несовершенства влияют на устойчивость сжатых или сжато-изогнутых элементов, что доказывается исследованиями работы [20]. Несовершенства оказывают значительное влияние на работу стальных конструкций при ударных воздействиях, что формирует более высокие требования к их изготовлению и монтажу в отличие, например, от железобетонных конструкций [21].

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение вопросов, связанных с совместной работой сооружения и основания при особых воздействиях. Так, Brandis и др. [22] рассматривают комплексный подход к анализу силового сопротивления стальных рамных конструкций динамическим нагружениям с учетом взаимодействия сооружения с грунтовым основанием. Отмечается, что важнейшим аспектом при анализе воздействий динамической природы на здания и сооружения является учет возможных провалов основания и их структурных перестроек. Некоторые работы посвящаются численному моделированию грунтового основания. Для стальных рам такие модели являются важным фактором оценки напряженно-деформированного состояния. Основание может моделироваться как нелинейными элементами типа «Link», так и упругими элементами типа «Spring» [23]. Известны подходы к моделированию с помощью «GAP» элементов или их аналогов [24], [25].

Представленный анализ результатов научных исследований по вопросу моделирования сопротивления каркасов зданий при особых воздействиях позволяет сделать вывод о том, что вопросы комплексного учета факторов особых воздействий нуждаются в

более детальном изучении. В связи с этим, целью настоящего исследования являлась разработка методики анализа механической безопасности стальных рамных конструкций при ударных воздействиях в условиях неопределенности их параметров, а также выявление наиболее опасных расчетных ситуаций и особенностей напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструктивной системы для возможности последующего учета в расчетах на прогрессирующее обрушение.

Модели и методы

Постановка задачи и объект исследования.

Объектом настоящего исследования являются рамные стальные конструкции, которые моделируются пространственными стержнями, испытывающими деформации растяжения-сжатия, изгиба и кручения. Узловые соединения стержней считаются жесткими. Прочность сварных швов полагается обеспеченной, параметры сварных соединений не рассматриваются. Рамная конструкция здания передает нагрузки через столбчатые железобетонные фундаменты на основание, для которого принята модель линейно деформируемого полупространства Винклера. Сечения стержневых элементов в общем случае могут иметь как открытый, так и закрытый тонкостенный профиль. При этом теснение деформации поперечных сечений при аварийных ударных нагрузках, близких к предельным, не учитывается. Для стадии нормальной эксплуатации конструкций учитываются ограничения по прочности, жесткости и устойчивости конструкции, жесткости грунтового основания. Предполагается, что перекрытия зданий представляют собой единое жесткое тело и при ударных воздействиях нет последствий, связанных с его локальным обрушением.

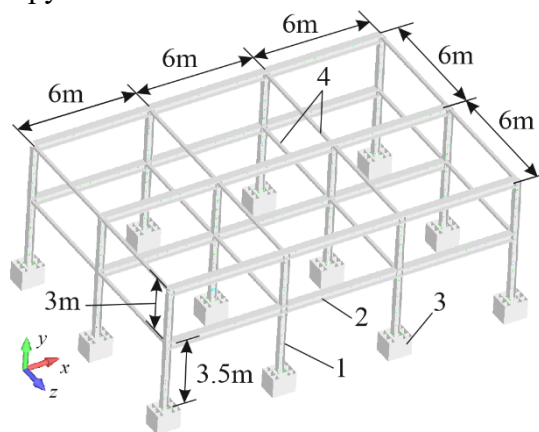


Рисунок 1 – Первичная расчетная схема: 1 – колонны, 2 – ригели, 3 – грунтовое основание, 4 распорки

Рассматривается рама здания, геометрия которой показана на рисунке 1. Сечение колонн выполнено из двутавра W12x12x65, сечение ригелей – W14x16x193 (ASTM), распорки и наклонные раскосы выполнены из трубы 150x150x5 (EN 10210). Материал стержней назначен в виде конструкционной стали с пределом текучести 250 МПа и модулем упругости 200 ГПа. Фундаменты имеют размеры 1,8x1,4 м. Грунтовое основание это песок крупный крупности с расчетным сопротивлением 500 кПа, модулем продольной деформации 50 МПа, модулем сдвига 20,83 МПа. Материалы работают по билинейным диаграммам деформирования с касательным модулем 100 Па, задаваемым для повышения устойчивости процесса численного интегрирования.

Моделирование ударных воздействий, алгоритм решения и ограничения задачи

Формы импульсов сил при аварийном нагружении показаны на рисунке 2 а-г. Интенсивности нагрузок, которые вводились в расчет следующие. Рама загружена равномерно распределённой нагрузкой по перекрытию 14,66 кПа. Эта нагрузка учитывает как постоянные нагрузки от веса стальных конструкций и перекрытия, так и длительную составляющую полезной нагрузки.

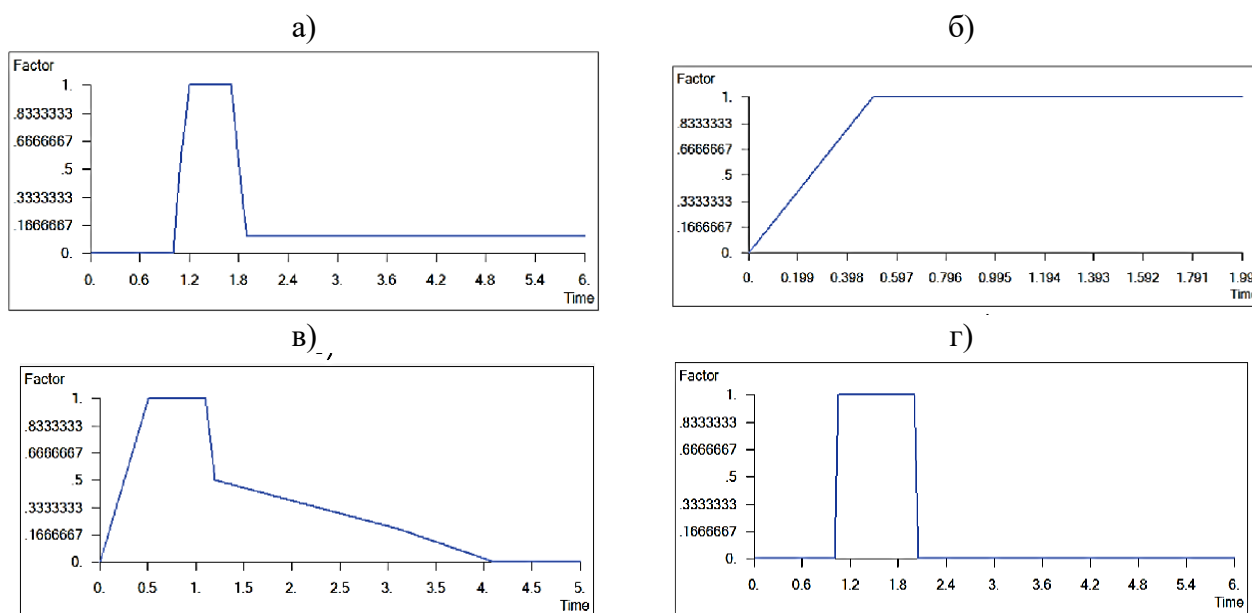


Рисунок 2 – Формы импульсов сил: от ударной нагрузки под углом (а), от статической нагрузки (б), от реакций грунтового основания (в), от горизонтальной ударной нагрузки (г)

Интенсивность горизонтального импульса (обозначим его I_H), который, в частности, может описывать удар автомобиля о колонну принималась равной 500 кН. интенсивность импульса под углом (обозначим его I_A) принималась в виде вертикальной составляющей 948,6 кН и горизонтальной 547,6 кН, что соответствует углу $\alpha = 60^\circ$ градусов к вертикальной оси. Такая нагрузка может создаваться, в частности от падения на здание воздушного транспортного средства, например, вертолета МИ-4 с экипированной массой 5,47 тонн, который под углом 60 градусов падает на конструкцию с конечной скоростью 72 км/ч и создает импульс $5,47 \text{ т} \cdot 20 \text{ м/с} = 109,4 \text{ тм/с}$. Также рассматривалась нагрузка, приводящая к выключению из работы половины площади грунтового основания под фундаментом с передачей импульса на фундамент по схеме E2, рисунок 2 г (IG). Ее максимальная интенсивность принималась такой же, как и для нагрузки I_A .

Ударные воздействия на рамную конструкцию задавались с помощью генератора случайных точек приложения и направлений импульсной нагрузки. Для нагрузки I_H всегда принималось направление «к раме», а высота была фиксированной и составляла 1 м. Для нагрузки I_A направления в силу симметрии рассматриваемой рамы выбирались из трех возможных: по оси x, по оси z и под углом 45 градусов к этим осям. Для нагрузки IG рассматривалось 2 возможных положения. Первое – исключение половины площади основания вдоль длинной стороны фундамента, вторая – исключение половины площади основания вдоль короткой стороны. Сформированы непересекающиеся подмножества $\{S_{IA}\}$, $\{S_{IH}\}$, $\{S_{IG}\}$ для множества значений точек приложения соответствующих нагрузок (рисунок 3). Стрелками на рисунке 3 а показано возможное направление нагрузки, серым цветом затушевана исключаемая из работы площадь грунтового основания под фундаментом.

Особые условия эксплуатации стальной рамной конструкции не предполагают детерминированной точки приложения ударного воздействия к конструкции, ее направления и интенсивности. Для учета таких условий эксплуатации формируется массив исходных данных и результатов расчетов, с помощью которых выполняется проектирование.

Случайное ударное воздействие представим в виде импульса $\dot{P}_t$, действующего на конструкцию в течение времени Δt , тогда эквивалент механической динамической силы будет равен $\dot{P}_d = \dot{P}_t / \Delta t$. В рамках квазистатического расчета условную статическую ударную

нагрузку можно считать внезапно приложенной на конструкцию. Тогда, используя известную формулу для оценки эффекта динамического удара, можно записать, что $\dot{P}_d = 2\dot{P}_{st}$. Таким образом для сокращения трудоемкости вычислений, связанных с развернутым динамическим расчетом, мы можем перейти от импульсной нагрузки к ее квазистатическому эквиваленту. С учетом формализма Ньютона значение этой нагрузки составит (1):

$$\dot{P}_{st} = \frac{m}{2\Delta t} \dot{v} \quad (1)$$

где m это масса жесткого тела, наносящего удар с конечной скоростью $\dot{v}$.

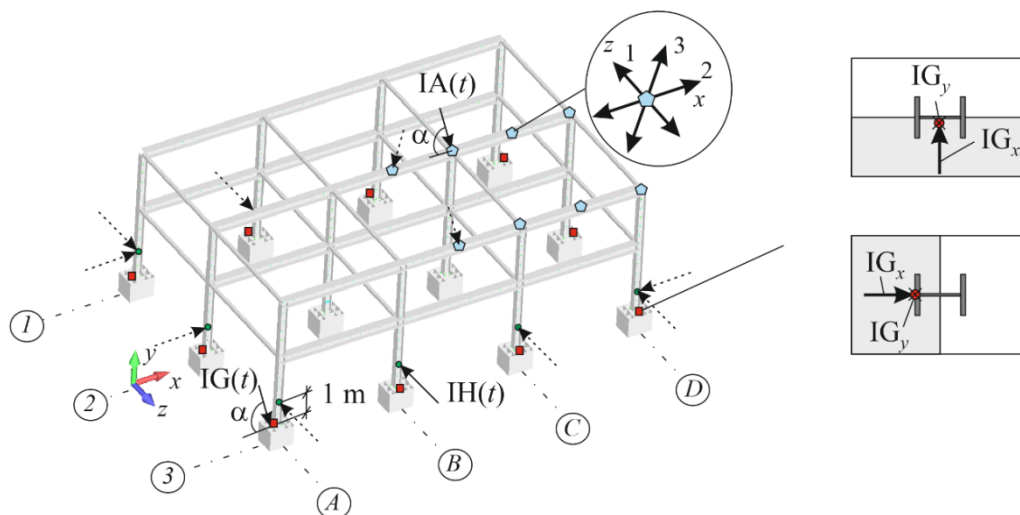


Рисунок 3 – Схема случайных нагружений статическими эквивалентами динамических воздействий $IH(t)$, $IG(t)$, $IA(t)$: 1,2,3 – плоскости в которых прилагается нагрузка IA , IG_x , IG_y это проекции статического эквивалента воздействия нагрузки $IG(t)$ на соответствующие оси координат

Таким образом, упрощенно, моделирование импульсного воздействия можно свести к статическому. Следует отметить, что такой прием в нашем случае не заменяет динамического расчета, а служит лишь средством для ускоренного поиска наиболее невыгодного расположения ударной нагрузки.

Генерация ударного нагружения включает следующие этапы:

1. Создание массивов значений для компонент вектора $\dot{v}$ в виде $\{(V_x, V_y, V_z)_i\}$, $i = 1..kV$, kV это число возможных для выбора значений компонент. На этом же этапе вычисляются компоненты вектора $\dot{P}_{st}$ в виде $\{(P_x, P_y, P_z)_i\}$.

2. Формирование массива данных S_e описывающих конструктивные элементы рамы (2):

$$S_e = \left\{ \begin{pmatrix} N_g & N_e \\ N_{fe} & N_{lst} \end{pmatrix}_j \right\}, j = 1..N_{Gfe} \quad (2)$$

Здесь N_g это номер группы конструктивных элементов, номинально может быть одна группа «стержни» или несколько групп – «балки», «колонны» и т.д.; N_e это число групп элементов в рамках одного конструктивного элемента; N_{fe} это число конечных элементов в группе N_g ; N_{lst} это номер первого конечного элемента в группе N_g ; N_{Gfe} это общее число конструктивных элементов. Очевидно, что для такой структуры данных нумерация конечных элементов в пределах одного конструктивного элемента должна быть ascending. Кроме того, число элементов в группе должно быть кратно шести.

3. Выбор случайным образом конструктивного элемента из структуры S_e ;

4. Случайный выбор третьего, четвертого или пятого узла в группе N_{fe} элементов, упорядоченных по списку с номера N_{1st} ;

5. Приложение в один из выбранных на этапе 4 узлов значения нагрузок, случайно выбираемых на этапе 1 из интервала $\{(P_x, P_y, P_z)_i\}$.

Критерии живучести стального рамного каркаса при особом воздействии

В качестве критериев живучести стальных рамных каркасов, подверженных ударным воздействиям, предлагается использовать следующие условия:

1. Недопущение значительных изменений геометрии конструктивной системы с учетом ее возможного пластического деформирования или потери устойчивости. Это условие можно сформулировать в виде (3):

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} \leq [f], \quad (3)$$

где f - полный прогиб системы при действии на нее ударного воздействия, определяемый проекциями f_x, f_y, f_z на глобальные оси координат, $[f]$ - предельное значение прогиба для особого предельного состояния. Для зданий со стальными конструкциями эта величина может определяться в зависимости от высоты этажа и величины пролета, образующегося в результате возможной потери устойчивости колонны (начальное локальное разрушение) при ударном воздействии.

В данном исследовании предлагается использовать следующие соотношения (4):

$$([f] = l_d / 15) \vee ([f] = kh_{fl} / 3), \quad (4)$$

где l_d - пролет поврежденной конструкции, h_{fl} - высота этажа, k - коэффициент, зависящий от значения этой высоты. Для типовых этажей более трех метров нами предлагается принимать $k = 2$, для высот 2,5-3 м - $k = 2,2$, для технических этажей (при необходимости) $k = 2,6$.

2. Условие сохранения сплошности материала, которое можно сформулировать для любого (наиболее нагруженного) сечения элемента. Пусть в сечении рассматривается n характерных наиболее напряженных точек, тогда получим (5):

$$\forall \varepsilon_i^{IV} : \varepsilon_i^{IV} < \varepsilon_u, i = [1..n], \quad (5)$$

где ε_u - относительные деформации стали, соответствующие его временному сопротивлению (пределу прочности), ε_i^{IV} - эквивалентные деформации, вычисляемые по формуле (6):

$$\varepsilon_i^{IV} = \frac{1}{3} \sqrt{2 \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_y)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2) \right]}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_x - \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ - компоненты тензора деформаций.

Метод расчета в динамической постановке стальных рамных конструкций на ударные воздействия.

Для каждого ударного воздействия в первой итерации делается линейный расчет, а в последующих итерациях решается следующая системы линейных уравнений (7):

$$[K]_r \{\delta\}^{(r)} = \{Q\} + \{\Delta\} \quad (7)$$

где $[K]_r$ - касательная матрица жесткости пространственной конечно-элементной модели; $\{\delta\}^{(r)}$ - вектор узловых перемещений, вычисляемый в итерации r ; $\{Q\}$ - вектор узловых сил для стадии нормальной эксплуатации, $\{\Delta\}$ - вектор самоуравновешенной системы малых узловых сил, которые могут принимать ненулевые значения для любой узловой степени свободы (для решения задачи начальной устойчивости МКЭ).

Касательная матрица жесткости может быть записана в виде (8):

$$[K]_r = [K] + \left[K_G \left(\{N\}^{(r-1)} \right) \right] \quad (8)$$

где $[K]$ это матрица жесткости конечно-элементной модели, $[K_G(\{N\}^{(r-1)})]$ это геометрическая матрица системы конечных элементов, выражаемая через найденные в итерации $r-1$ продольные силы в стержнях, объединяемые в вектор $\{N\}^{(r-1)}$.

Введем оценку обеспечения устойчивости конструкции, основываясь на предпосылке, что отсутствие сходимости решений указывает на потерю устойчивости. Контроль приближения к состоянию неустойчивости осуществляем путем проверки для заданного номера итерации $r_o \geq 3$ условия (9):

$$\left| 1 - \frac{U^{(r_o)}}{U^{(r_o-1)}} \right| \leq \alpha \quad (9)$$

где $U^{(r_o)}$, $U^{(r_o-1)}$ это энергии деформации дискретизированного объекта, полученные в итерациях r_o и r_o-1 соответственно, α – задаваемое малое положительное число.

Как показывают расчеты, достаточно эффективная проверка такого типа обеспечивается при $r_o = 4..6$, $\alpha = 0.001$. При этом после выполнения второй итерации касательную матрицу жесткости можно не пересчитывать, так как продольные силы при $r \geq 3$ существенно не меняются.

Общее уравнение динамики неупругого удара.

Движение системы, подвергаемой неупругому удару, можно приближенно описать уравнениями метода конечных элементов (10):

$$[M(\{Z\})]\{\ddot{Z}\} + [C(\{Z\})]\{\dot{Z}\} + \{R(\{Z\})\} = \{F(t)\} + \{G\}\chi(t), \quad (10)$$

где $[M(\{Z\})]$, $[C(\{Z\})]$ – матрица масс и матрица демпфирования; $\{R(\{Z\})\}$, $\{Z\}$ – векторы узловых реакций и обобщенных узловых перемещений; $\{F(t)\}$ – вектор действующих на систему нормативных нагрузок; $\{G\}$ – вектор, определяемый силами тяжести ударяющего тела; $\chi(t)$ – функция Хевисайда ($\chi=0$, если время $t < 0$, или; $\chi=1$, если $t \geq 0$).

Будем учитывать следующие начальные условия: $\{Z(0)\} = 0$; $\{\dot{Z}(0)\} = \{V\}$, где $\{V\}$ – вектор начальных скоростей. Рассмотрим численное решение этой начальной задачи на основе предпосылки метода Ньюмарка о постоянных значениях ускорений на каждом шаге интегрирования. Для реализации такого подхода строим конечно-элементные модели, учитывая геометрию системы в деформированном состоянии. Полагаем, что на каждом шаге Δt численного интегрирования решается линейная задача. Для начального времени t_{n-1} некоторого шага n рассматривается матрица масс $[M(t_{n-1})]$, матрица демпфирования $[C(t_{n-1})]$ и касательная матрица жесткости $[K_r(t_{n-1})]$. Для описания демпфирующих свойств стальной рамной системы матрицу $[C(t_{n-1})]$ допускается представлять в виде (11):

$$[C(t_{n-1})] = \beta [K_r(t_{n-1})] \quad (11)$$

где β – коэффициент конструкционного демпфирования.

Вектор $\{R(\{Z\})\}$ для момента времени окончания n -го шага интегрирования может быть приближенно определен по формуле (12):

$$\{R(\{Z_n\})\} = \sum_{k=1}^n [K_r(t_{n-1})]\{\Delta Z_{n-1}\} \quad (12)$$

где $\{\Delta Z_{n-1}\}$ – вектор приращений перемещений на $n-1$ -м шаге интегрирования.

Моделирование деформаций грунтового основания.

При рассмотрении ударных воздействий напряженно-деформированное состояние фундамента не учитывается, в расчетной модели фундамент присутствует как абсолютно

жесткое тело. Требуемую жесткость основания для выполнения условий нормальной эксплуатации определяется выражением (13):

$$\left(\frac{|f_v|}{[u] + [f_v]} - 1 \leq 0 \right) \wedge \left(\frac{|f_h|}{[f_h]} - 1 \leq 0 \right), \quad (13)$$

где f_v , f_h – вертикальные и горизонтальные прогибы, возникшие в результате совместной деформации рамной конструкции и грунтового основания; $[u]$ – допустимое по нормативам механики грунтов значение осадки грунтового основания; $[f_v]$, $[f_h]$ – допустимые значения вертикального и горизонтального перемещений конструктивных элементов, регламентируемые эстетическими требованиями.

При рассмотрении аварийной ситуации, связанной с ударными воздействиями, полагаем, что вертикальная составляющая удара не вызывает нелинейных деформаций грунта. Поэтому для моделирования исключения части грунта из работы системы «основание-сооружение» используется упрощенный подход, основанный на базовых принципах стержневых GAP – элементов, описанный в работе [26]. Для расчета в квазистатической постановке используется модификация этой схемы (рисунок 4).

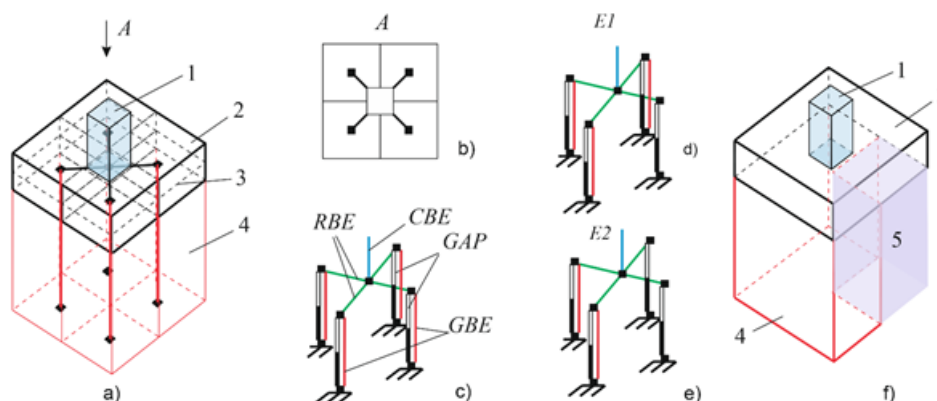


Рисунок 4 – Моделирование деформаций основания:

- a) общая схема: 1 – стальная колонна, 2 – фундамент, 3 – срединная поверхность фундамента, 4 – грунтовое основание;
 б) вид А; в) типы конечных элементов: RBE – жесткое тело; CBE – column beam element;
 GBE – elastic beam element for soil modelling; GAP – элементы, моделирующие зазор;
 д), е) возможные аварийные ситуации E1 и E2, связанные с исключением грунтового основания;
 ф) интерпретация ситуации E1: 5) – аварийно исключенный объем грунта

В каждый узел упругого стержневого элемента, моделирующего грунт, вводится гар-элемент, имеющий величину зазора, равную величине прогнозируемой просадки. Жесткость на растяжение этого элемента назначается близкой к нулю (для несвязного грунта), а жесткость на сжатие и сдвиг подбираются таким образом, чтобы перемещений фактически не было.

Результаты

Анализ конструкции выполнялся на основе метода конечных элементов в программном комплексе Siemcenter Femap 2021.2. Результаты расчетов рамной конструкции на аварийные воздействия с проверкой условия живучести приведены в таблице 1. Здесь расположение точки воздействия обозначено в соответствии с осями на рисунке 3.

Таблица 1 – Результаты расчетов

№	Точка приложения (см. рис. 3), тип воздействия	Условие живучести	Изменения конструкции для обеспечения живучести
1	2	3	4
1	1/A, 3/A: IH(t)	Обеспечено	-
2	2/A: IH(t)	То же	-
3	A/1, A/3: IH(t)	Не обеспечено	Установка раскосов на 1 этаже
1	2	3	4
3a	A/1, A/3: IH(t)	Обеспечено	-
4	B/1, B/3: IH(t)	То же	-
5	2/A: IG(t) все направления (рис. 5 б)	То же	-
6	3/A: IG(t) все направления	То же	-
7	B/3: IG(t) все направления	То же	-
8	2/D: AG(t), направления	± 1	Установка раскосов на 2 этаже торцовой рамы
		± 2	
		± 3	
9..15	2/C, 3/C, 3/D, 2/C-D, 2/B-C, 3/C-D, 3/B-C: AG(t), направления	± 1	-
		± 2	
		± 3	

Анализ результатов квазистатических расчетов показал, что воздействия, связанные с исключением основания наименее опасны при заданных размерах фундаментов, однако при других воздействиях имеет место пластическая работа грунта. Этот фактор нужно учитывать в расчетах на ударные воздействия. Горизонтальные и вертикальные ударные воздействия привели к необходимости введения диагональных раскосов с целью обеспечения живучести стального рамного каркаса. На рисунке 5 приведены некоторые результаты проверочных расчетов в динамической постановке. При этом для материала грунта принимается коэффициент конструкционного демпфирования $\beta = 0,117$ [27], общее демпфирование для системы рама-грунт с учетом ее податливого основания $\beta = 0,1$.

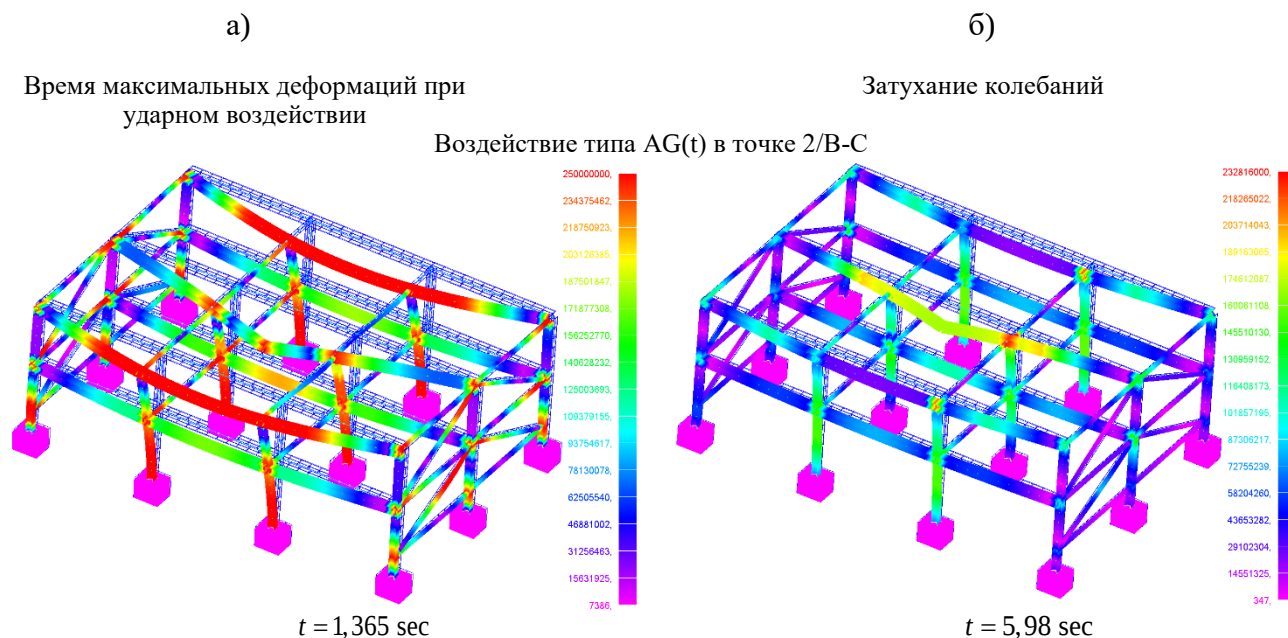


Рисунок 5 – Динамический расчет стальной рамы на ударное воздействие:
а) распределение эквивалентных напряжений фон Мизеса для пикового значения нагрузки;
б) то же, но для стабилизированного состояния конструкции после удара

Расчеты показывают, что наиболее значительные повреждения получают точки приложения ударной нагрузки на конструкцию и узловые соединения. Поэтому очень важно обеспечивать их прогнозируемую работу при передаче силового потока от точки удара на основание. При этом следует учитывать характер работы конструктивных элементов на всем интервале динамического расчета. Это удобно делать с помощью графиков. На рисунке 6 а показаны графики изменения во времени напряжений для точки удара, на рисунке 6 б – для сжатой краевой точки грунтового основания для конструкции при воздействии согласно таблице 1.

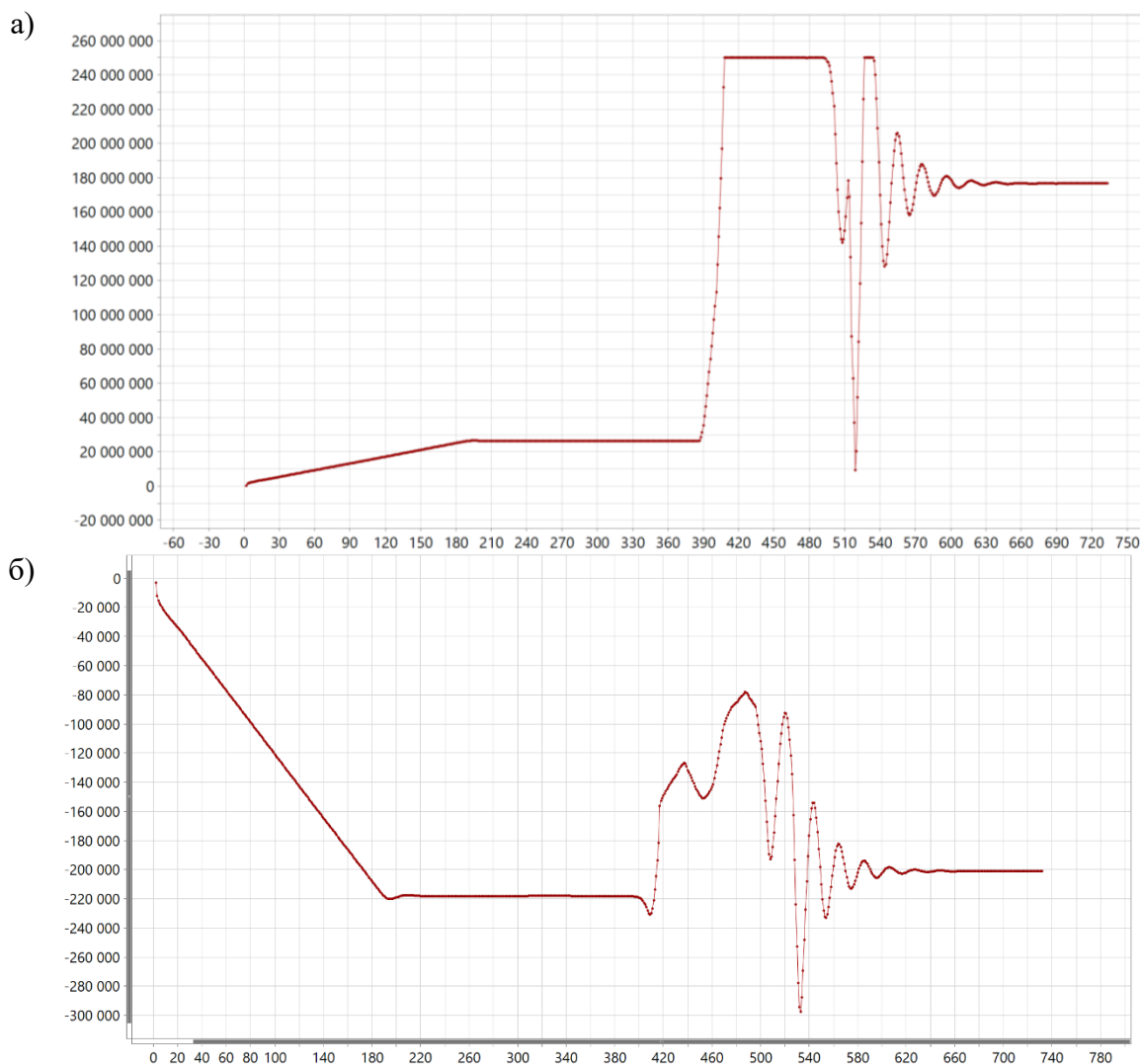


Рисунок 6 – Изменение напряжений во времени: а) точка 2/В-С, воздействие $AG(t)$, эквивалентные напряжения фон Мизеса (по оси x отложены шаги по времени, каждый шаг равен 0,008275 sec; б) грунт под фундаментом 3/С, крайняя точка в направлении $+z$

Выводы

Разработан подход к оценке живучести стальных рамных каркасов зданий при случайных ударных воздействиях включающий:

- процедуру генерации импульсных ударных воздействий на рамную систему, моделирующих высокоскоростное сосредоточенное воздействие, приближенно имитирующее удар абсолютно жестким телом малой массы;
- методику учета локальных повреждений грунтового основания при ударном воздействии.

Анализ результатов квазистатических расчетов показал, что воздействия, связанные с исключением основания наименее опасны при заданных размерах фундаментов, однако при других воздействиях имеет место пластическая работа грунта. Этот фактор нужно учитывать в расчетах на ударные воздействия. Горизонтальные и вертикальные ударные воздействия привели к необходимости введения диагональных раскосов с целью обеспечения живучести стального рамного каркаса.

Наиболее значительные повреждения получают точки приложения ударной нагрузки на конструкцию и узловое соединения. Поэтому очень важно обеспечивать их прогнозируемую работу при передаче силового потока от точки удара на основание.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта НИУ МГСУ. Приказ 453/130 от 15.05.2023 "О реализации проектов, поддержанных по результатам конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР) научными коллективами НИУ МГСУ".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tur A.V., Tur V.V., Lizahub A.A. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss // *Building and reconstruction*. 2023. Vol. 105. No. 1. С. 77–103.
2. Травуш В.И., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 4–11.
3. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 2. С. 19–26.
4. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // *MATEC Web of Conferences* / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. Pp. 02047.
5. Алексейцев А.В. Анализ устойчивости колонны при горизонтальных ударных воздействиях // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12.
6. Алексейцев А.В., Курченко Н.С., Антонов М.Д., Морозова Д.В. Несущая способность аварийно догружаемых железобетонных колонн с начальными несовершенствами // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6. С. 104–115. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-104-115>
7. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 4. С. 23–34. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-23-34>
8. СП 296.1325800.2017 "Здания и сооружения. Особые воздействия". Изм.1, 2. Москва: Стандартинформ, 2020.
9. CEN Comité Européen de Normalisation. EN 1991-1-7: eurocode 1 – actions on structures – part 1–7: general actions – accidental actions. Brussels (Belgium): CEN, 2006.
10. ASCE/SEI 7-10. Minimum design loads for buildings and other structures / American Society of Civil Engineers. p. cm. - (ASCE standard.) "Revision of ASCE 7-10." 2010. P. 658.
11. UFC. UFC 4-023-03. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse // *Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*. 2016. № November. Pp. 34–37.
12. General services administration alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance approved for public release; distribution unlimited GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. 2013.
13. СП 385.132580.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Москва: Минстрой России, Стандартинформ, 2018.
14. Kiakojouri F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Eng Struct*. Elsevier, 2020. Vol. 206. December 2019. Pp. 110061.
15. Tagel-Din H., Rahman N.A. Simulation of the Alfred P. Murrah federal building collapse due to blast loads // *AEI 2006: Building Integration Solutions - Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference*. 2006. Vol. 2006. Pp. 32.
16. Sadeghi A., Kazemi H., Samadi M. Reliability and reliability-based sensitivity analyses of steel moment-resisting frame structure subjected to extreme actions // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2021. Vol. 15. No. 57.
17. Mirkarimi S.P., Mohammadi Dehcheshmeh E., Broujerdian V. Investigating the Progressive Collapse of Steel Frames Considering Vehicle Impact Dynamics // *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 2022. Vol. 46. No. 6.

18. Sadeghi A. et al. Fragility analysis of steel moment-resisting frames subjected to impact actions // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2022. Vol. 7. No. 1.
19. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent Geometric Imperfections for Local Buckling of Slender Box-section Columns // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021. Vol. 65. No. 4. Pp. 1279–1287.
20. Rzeszut K. Post-Buckling Behaviour of Steel Structures with Different Types of Imperfections // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. No. 18.
21. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Safety of Reinforced Concrete Columns: Effect of Initial Imperfections and Material Deterioration under Emergency Actions // *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 4. Pp. 1054.
22. Brandis A., Kraus I., Petrovčič S. Nonlinear Static Seismic Analysis and Its Application to Shallow Founded Buildings with Soil-Structure Interaction // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 11.
23. Brandis A., Kraus I., Petrovčič S. Simplified numerical analysis of soil–structure systems subjected to monotonically increasing lateral load // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 9.
24. Wei D., Suizi J. Restoring Force Model for Composite-Shear Wall with Concealed Bracings in Steel-Tube Frame // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 9.
25. Forcellini D. A novel framework to assess soil structure interaction (Ssi) effects with equivalent fixed-based models // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 21.
26. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 103. No. 3.
27. Тер-Мартirosян А.З., Сидоров В.В. Особенности моделирования работы основания при динамических нагрузках при эксплуатации метрополитена // *Жилищное строительство*. 2022. № 12. С. 26–33.

REFERENCES

1. Tur A.V., Tur V.V., Lizahub A.A. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss. *Building and reconstruction*. 2023. Vol. 105. No. 1. Pp. 77–103.
2. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2015. No. 3. Pp. 4–11.
3. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2019. No. 2. Pp. 19–26.
4. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. Pp. 02047.
5. Alekseytsev A.V. Stability of the RC Column under Horizontal Impacts. *Reinforced concrete structures*. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 3–12.
6. Alekseytsev A.V. et al. Bearing capacity of emergency loaded reinforced concrete columns with initial imperfections. *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 104. No. 6. Pp. 104–115.
7. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dynamics of reinforced concrete non-beam frames in case of damage to slabs punching. *Building and reconstruction*. 2021. Vol. 96. No. 4. Pp. 23–34.
8. Building Code of RF SP 296.1325800.2017 Buildings and structures. Accidental actions. With amendments 1, 2. Moscow: Standardinform, 2020.
9. CEN Comité Européen de Normalisation. EN 1991-1-7: eurocode 1 – actions on structures – part 1-7: general actions – accidental actions. Brussels (Belgium): CEN, 2006.
10. ASCE/SEI 7-10. Minimum design loads for buildings and other structures / American Society of Civil Engineers. p. cm. - (ASCE standard.) "Revision of ASCE 7-10." 2010. P. 658.
11. UFC. UFC 4-023-03. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse // *Design of Buildings To Resist Progressive Collapse*. 2016. November. Pp. 34–37.
12. General services administration alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance approved for public release; distribution unlimited GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. 2013.
13. Building Code of RF SP 385.132580.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow: Standardinform, 2018.
14. Kiakojouri F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Eng Struct*. 2020. Vol. 206. December 2019. P. 110061.
15. Tagel-Din H., Rahman N.A. Simulation of the Alfred P. Murrah federal building collapse due to blast loads. AEI 2006: Building Integration Solutions - Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference. 2006. Vol. 2006. P. 32.
16. Sadeghi A., Kazemi H., Samadi M. Reliability and reliability-based sensitivity analyses of steel moment-resisting frame structure subjected to extreme actions. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2021. Vol. 15. No. 57.
17. Mirkarimi S.P., Mohammadi Dehcheshmeh E., Broujerdian V. Investigating the Progressive Collapse of Steel Frames Considering Vehicle Impact Dynamics. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 2022. Vol. 46. No. 6.
18. Sadeghi A. et al. Fragility analysis of steel moment-resisting frames subjected to impact actions. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2022. Vol. 7. No. 1.

19. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent Geometric Imperfections for Local Buckling of Slender Box-section Columns. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021. Vol. 65. No. 4. Pp. 1279–1287.
20. Rzeszut K. Post-Buckling Behaviour of Steel Structures with Different Types of Imperfections. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. No. 18.
21. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Safety of Reinforced Concrete Columns: Effect of Initial Imperfections and Material Deterioration under Emergency Actions. *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 1054.
22. Brandis A., Kraus I., Petrovčič S. Nonlinear Static Seismic Analysis and Its Application to Shallow Founded Buildings with Soil-Structure Interaction. *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 11.
23. Brandis A., Kraus I., Petrovčič S. Simplified numerical analysis of soil–structure systems subjected to monotonically increasing lateral load. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 9.
24. Wei D., Suizi J. Restoring Force Model for Composite-Shear Wall with Concealed Bracings in Steel-Tube Frame. *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 9.
25. Forcellini D. A novel framework to assess soil structure interaction (Ssi) effects with equivalent fixed-based models. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 21.
26. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 103. No. 3.
27. Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V. Features of Modeling the Operation of the Base under Dynamic Loads During the Operation of the Subway. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2022. No. 12. Pp. 26–33.

Информация об авторах:

Курченко Наталья Сергеевна

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

кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Савин Сергей Юрьевич

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

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Information about authors:

Kurchenko Natalia S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate in technical sciences, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Savin Sergey Yu.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate in technical sciences, associate professor, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: savinsyu@mgsu.ru