

С.Ю. САВИН¹, В.И. КОЛЧУНОВ^{2,3}, В.В. КОВАЛЕВ³¹ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия³ Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ЖЕЛЕ- ЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ПРИ АВАРИЙНОЙ РАСЧЕТНОЙ СИТУАЦИИ

Аннотация. В соответствии с СП 385.1325800 при реконструкции объектов повышенного и нормального уровня ответственности должна быть обеспечена их защита от прогрессирующего обрушения. Однако исследования сопротивления конструктивных систем, прошедших реконструкцию, при сценариях особых воздействий, связанных с внезапными структурными перестройками, в научной литературе практически отсутствуют. В связи с этим предметом исследования данной статьи является сопротивление прогрессирующему обрушению железобетонного каркаса реконструируемого промышленного здания с элементами усиления, выполненными из стальных прокатных профилей. Показано, что при большей начальной гибкости сжато-изгибаемых элементов возможен сценарий исчерпания несущей способности, связанный с потерей устойчивости. В связи с этим для такого анализа предлагается использовать нелинейный расчет устойчивости деформированных состояний конструктивной системы в качестве дополнительного инструмента при оценке сопротивления каркасов зданий и сооружений прогрессирующему обрушению.

Ключевые слова: железобетон, рамный каркас, аварийная ситуация, реконструкция, прогрессирующее обрушение, потеря устойчивости.

S.Yu. SAVIN¹, V.I. KOLCHUNOV^{2,3}, V.V. KOVALEV³¹ Scientific Research Institute of Construction Physics of RAACS, Moscow, Russia² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia³ Southwest State University, Kursk, Russia

CRITERIA FOR EVALUATING THE BEARING CAPACITY OF COMPRESSED-BENT ELEMENTS OF A RECONSTRUCTIBLE REINFORCED CONCRETE FRAME AT ACCIDENTAL IMPACT

Abstract. In accordance with SP 385.1325800, during the reconstruction of facilities of an increased and normal level of responsibility, their protection against progressive collapse should be ensured. However, studies devoted to the resistance of reconstructed structural systems subjected to sudden structural transformation are practically absent in the scientific literature. In connection with this the subject of research in this article is the resistance to the progressive collapse of the reinforced concrete frame of the reconstructed industrial building with reinforcing elements made of steel rolling profiles. It is shown that with a greater initial flexibility of compressed-bent elements, a scenario of exhaustion of the bearing capacity associated with a buckling is possible. In this regard, it is proposed to use a nonlinear calculation of the stability of the deformed states of the structural system as an additional tool in assessing the resistance of building frames and structures to progressive collapse.

Keywords: reinforced concrete, moment frame, accidental impact, reconstruction, progressive collapse, buckling.

Введение

Рост темпов строительства во многих странах, наблюдаемый на протяжении последних десятилетий, привел помимо всего прочего и к увеличению числа случаев внезапных отказов несущих элементов конструктивных систем. Такие аварии, как Ронан Пойнт (Лондон,

1968), торговый центр Сампун (Сеул, 1995), Всемирный торговый центр (Нью-Йорк, 2001), Рана-Плаза (Савар, 2013) и др., показали, что внезапный отказ одного несущего элемента конструктивной системы может привести к непропорциональному отказу и полному обрушению сооружения или отдельных его частей, что может сопровождаться человеческими жертвами и значительным материальным ущербом. В связи с этим активное развитие в теории сооружений приобрели исследования сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений прогрессирующему обрушению при «удалении» одного из несущих элементов.

Значительное число научных публикаций в данной области посвящено исследованию особого предельного состояния [1] для изгибаемых [2-13] или растянутых [14-16] элементов конструктивных систем. При этом вопросам сопротивления сжато-изогнутых несущих элементов, к которым относятся колонны, пилоны и предварительно напряженной ригели, в мировой научной литературе не уделяется должного внимания. Немногочисленные работы в данном направлении посвящены преимущественно исследованиям сопротивления стальных рамных каркасов [11, 12]. Применительно к железобетону эти работы ещё более немногочисленны [13, 16, 17]. Следует также обратить внимание и на то, что практически во всех упомянутых публикациях объектами исследований являются конструктивные системы вновь возводимых зданий, исследования сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем эксплуатируемых зданий, прошедших реконструкцию, по-видимому, отсутствуют.

В связи с этим предметом исследования, приведенного в данной статье, является сопротивление прогрессирующему обрушению железобетонного каркаса реконструируемого промышленного здания с элементами усиления, выполненными из стальных прокатных профилей.

Модели и методы

В качестве объекта исследования в работе выбран железобетонный каркас служебно-бытового корпуса СББ КПЖРО Курская АЭС На этапе проектирования и строительства были допущены ошибки, которые привели к отрыву фундаментов колонн крайнего ряда по оси «А» от основания (рисунок 1а).

В качестве варианта усиления железобетонного каркаса предложено установить в осях «А – Б» под ригели дополнительные стальные балки 30Ш1/С255 [18], опирающиеся по оси «Б» на стальные опорные столики, смонтированные на существующие железобетонные колонны, а по оси «А» и в пролете – на раскосы, выполненных из стальных двутавров 30Ш1/С255 и опирающихся на отдельный ленточный фундамент (рисунок 1б).

Размеры стальных прокатных профилей подобраны на основании статического расчета методом конечных элементов по нелинейной деформационной модели в программном комплексе ЛИРА-САПР на расчетные сочетания усилий от постоянных и временных нагрузок. По результатам расчета установлено, что на этапе нормальной эксплуатации усилия и деформации в реконструированном каркасе не превышают допустимых значений.

Рассмотрим аварийную ситуацию, при которой один из раскосов будет внезапно удален из работы конструктивной системы (рисунок 2). Для анализа сопротивления рассматриваемой конструктивной системы использован квазистатический метод [1], впервые предложенный в работах [19, 20], и основанный на условии постоянства полной удельной энергии деформации конструктивного элемента (рисунок 3а):

$$\begin{aligned} \Phi(\varepsilon_{n-1}^d) - \Phi(\varepsilon_n^s) &= \sigma_{n-1}^s (\varepsilon_{n-1}^d - \varepsilon_n^s), \\ \sigma_{n-1}^d &= 2\sigma_{n-1}^s - \sigma_n^s, \\ N_{n-1}^d &= 2N_{n-1}^s - N_n^s, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{n-1}^d , σ_{n-1}^s , σ_n^s – соответственно, напряжения и относительные деформации в системе n-1 (вторичной расчетной схеме с отброшенной связью) при динамическом (d) и статическом (s) нагружении и в системе n при статическом нагружении; U_{n-1}^d , U_{n-1}^s – соответственно потенциальная энергия деформации при динамическом и статическом нагружении в системах n-1 и n.

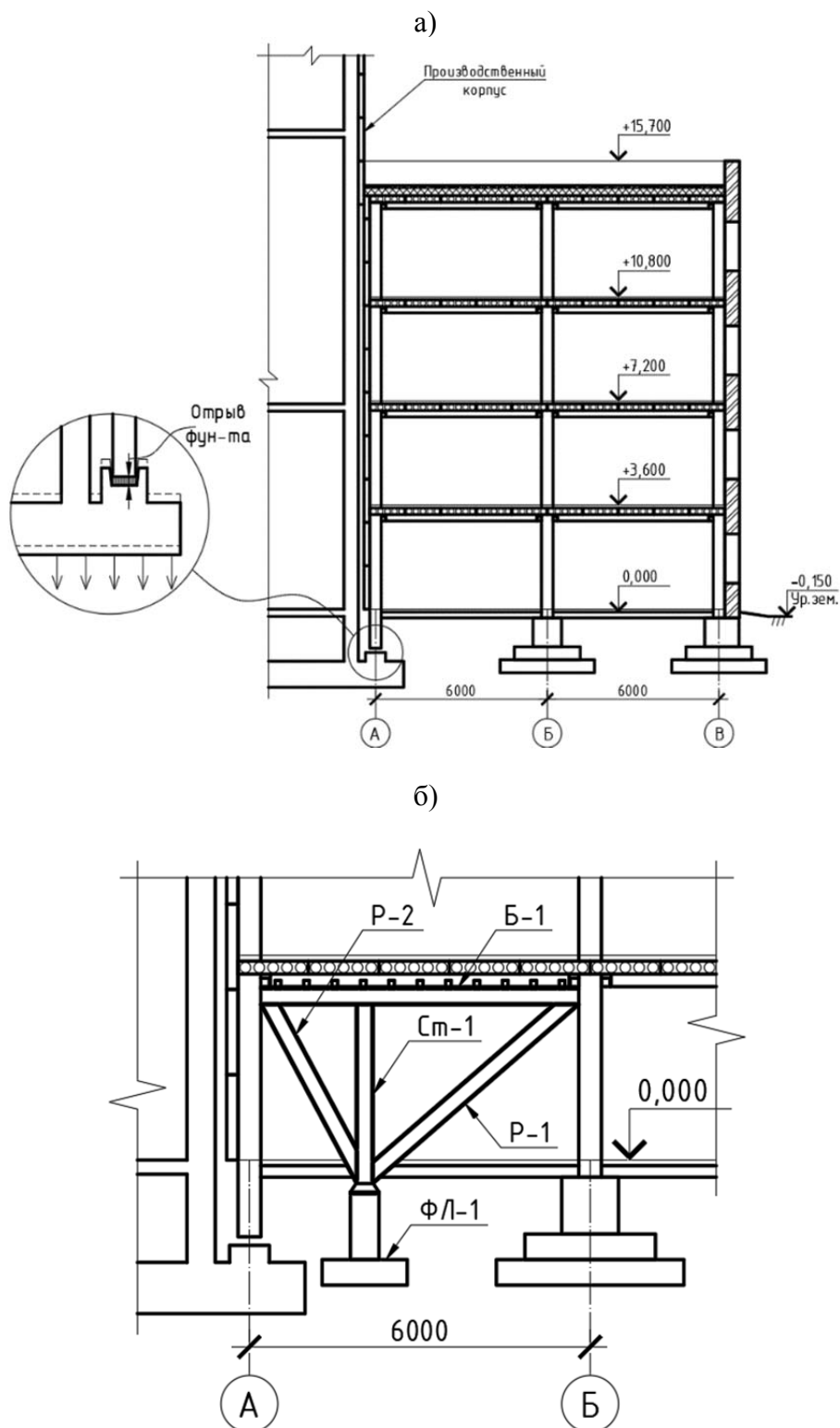


Рисунок 1 – Конструктивная схема здания: а) до усиления; б) после усиления

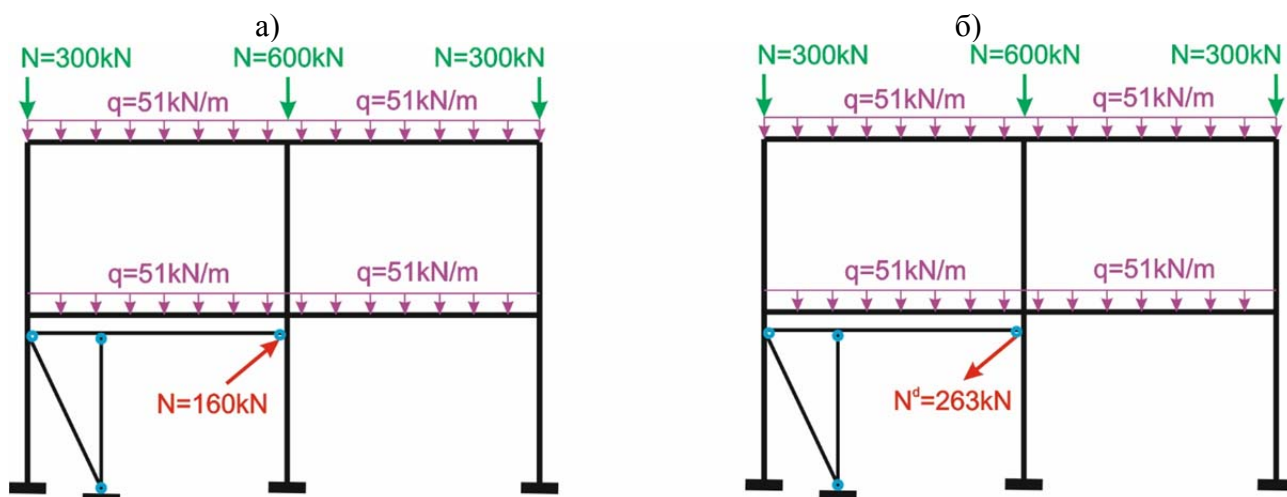


Рисунок 2 - Вторичная расчетная схема железобетонной рамы для анализа сопротивления прогрессирующему обрушению: а) на этапе первых разрушений; б) на этапе максимального динамического догружения вторичной расчетной схемы

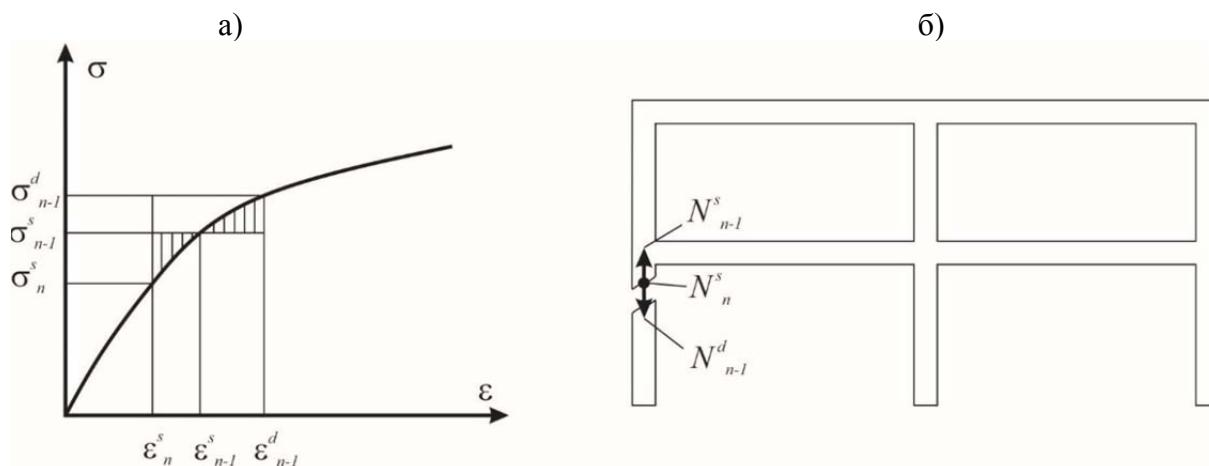


Рисунок 3 - К определению обобщенного усилия по месту отбрасываемой связи (конструктивного элемента): а) диаграмма работы бетона при одноосном сжатии; б) усилие по месту удаляемой колонны каркаса здания

При использовании данного метода вместо усилия, действовавшего на стадии нормальной эксплуатации в «удаляемом» элементе первичной расчетной схемы (система «п»), во вторичной расчетной схеме (система «п-1») прикладывается равное ему по величине и противоположное по знаку обобщенное усилие по месту отбрасываемой связи (рисунок 3б).

При использовании идеализированных двух- или трехлинейных диаграмм деформирования железобетона такой подход будет давать несколько завышенные значения усилий в элементах системы «п – 1», поскольку не будут учитываться потери кинетической энергии при деформировании, связанные с развитием неупругих деформаций и вязким сопротивлением материала. Однако это превышение учитывается нами только на первой полуволне колебаний системы при динамическом догружении и идет в запас прочности.

Для получения наиболее полных представлений о характере деформирования рассматриваемого железобетонного каркаса, усиленного стальными прокатными профилями, при внезапном удалении одного из раскосов были использованы два варианта расчета: статический расчет на основе нелинейной деформационной модели и нелинейный расчет устойчивости деформированных состояний конструктивной системы. При расчете по нелинейной деформационной модели в качестве параметра, характеризующего деформативность железобетона, применялся касательный модуль деформаций по итерации $j-1$, использование которого в расчетах на устойчивость дает несколько завышенные значения критической силы. Во

втором случае, при расчете устойчивости деформированных состояний конструктивной системы, используется касательный модуль упругости для деформированного состояния, отражающий специфику задачи о потере устойчивости и определяемый как функция от деформаций, вычисленных для железобетонных элементов по результатам их расчета по нелинейной деформационной модели:

$$I_{red,\theta} = I_{red,\theta 1} - A_{red,\theta} \cdot a_{\theta}^2, \quad (2)$$

$$I_{red,\theta 1} = \frac{E_s}{E_0} \cdot A_s \cdot a^2 + \frac{E_s}{E_0} \cdot A'_s \cdot (h - a')^2 + b \cdot \int_{h_{crc}}^{h-x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}_{bt}}\right) \cdot y^2 dy + b \int_{h-x}^h \left(1 - \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}_b}\right) \cdot y, \quad (3)$$

$$a_{\theta} = \frac{S_{red,\theta}}{A_{red,\theta}}, \quad (4)$$

$$S_{red,\theta} = \frac{E_s}{E_0} \cdot (A_s \cdot a + A'_s \cdot (h - a')) + b \cdot \int_{h_{crc}}^{h-x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}_{bt}}\right) y dy + b \cdot \int_{h-x}^h \left(1 - \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}_b}\right) y dy, \quad (5)$$

$$A_{red,\theta} = b \cdot \int_{h_{crc}}^{h-x} \frac{E_{k,bt}}{E_0} dy + b \int_{h-x}^h \frac{E_{k,b}}{E_0} dy + A_{s,tot} \cdot \frac{E_s}{E_0}, \quad (6)$$

где $I_{red,\theta}$ – момент инерции приведенного по касательному модулю поперечного сечения относительно собственного центра тяжести;

$I_{red,\theta 1}$ – момент инерции приведенного по касательному модулю поперечного сечения относительно центра тяжести недеформированного поперечного сечения;

$A_{red,\theta}$ – площадь приведенного по касательному модулю поперечного сечения;

$S_{red,\theta}$ – статический момент приведенного по касательному модулю поперечного сечения;

a_{θ} – координата центра тяжести приведенного по касательному модулю сечения, отсчитываемая от оси, относительно которой определен $S_{red,\theta}$;

x – высота сжатой зоны;

b, h – ширина и высота поперечного сечения соответственно;

$E_{k,b}; E_{k,bt}$ – касательный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении соответственно;

$A_s; A'_s$ – площадь сжатой и растянутой (наименее сжатой) арматуры соответственно;

h_{crc} – глубина образовавшейся в сечении трещины;

$E_s; E_0$ – модуль упругости стали и начальный модуль упругости бетона соответственно;

$\hat{\varepsilon}_b; \hat{\varepsilon}_{bt}$ – параметры нелинейной диаграммы деформирования бетона, принимаемые по СП 63.13330.2018, приложению Г.

В качестве альтернативного метода для определения деформаций может быть использован МППУ, предложенный Биргером И.А. [21], который позволяет учесть в том числе ниспадающие ветви диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Для установления последовательности разрушения элементов конструктивной системы при внезапном удалении одного из раскосов усиления, удаляемый раскос моделировался путем приложения во вторичной расчетной схеме действовавших в нем усилий, которые поэтапно снижались до нуля, а затем ступенчато нарастали до величины усилия в удаляемом раскосе, но прикладывалось это усилие с обратным знаком по отношению к первичной расчетной схеме. На каждом этапе нагружения анализировались деформации и усилия в элементах конструктивной системы.

Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета рассматриваемой конструктивной системы по нелинейной деформационной модели и результаты нелинейного расчета устойчивости ее деформированных состояний представлены в виде эпюр изгибающих моментов и продольных сил, а также формы потери устойчивости на этапе появления первых разрушений во вторичной расчетной схеме при перераспределении силовых потоков в связи с удалением одного из раскосов (рисунки 4 а, б, в) и на этапе максимального динамического догружения вторичной расчетной схемы (рисунки 4 г, д, е).

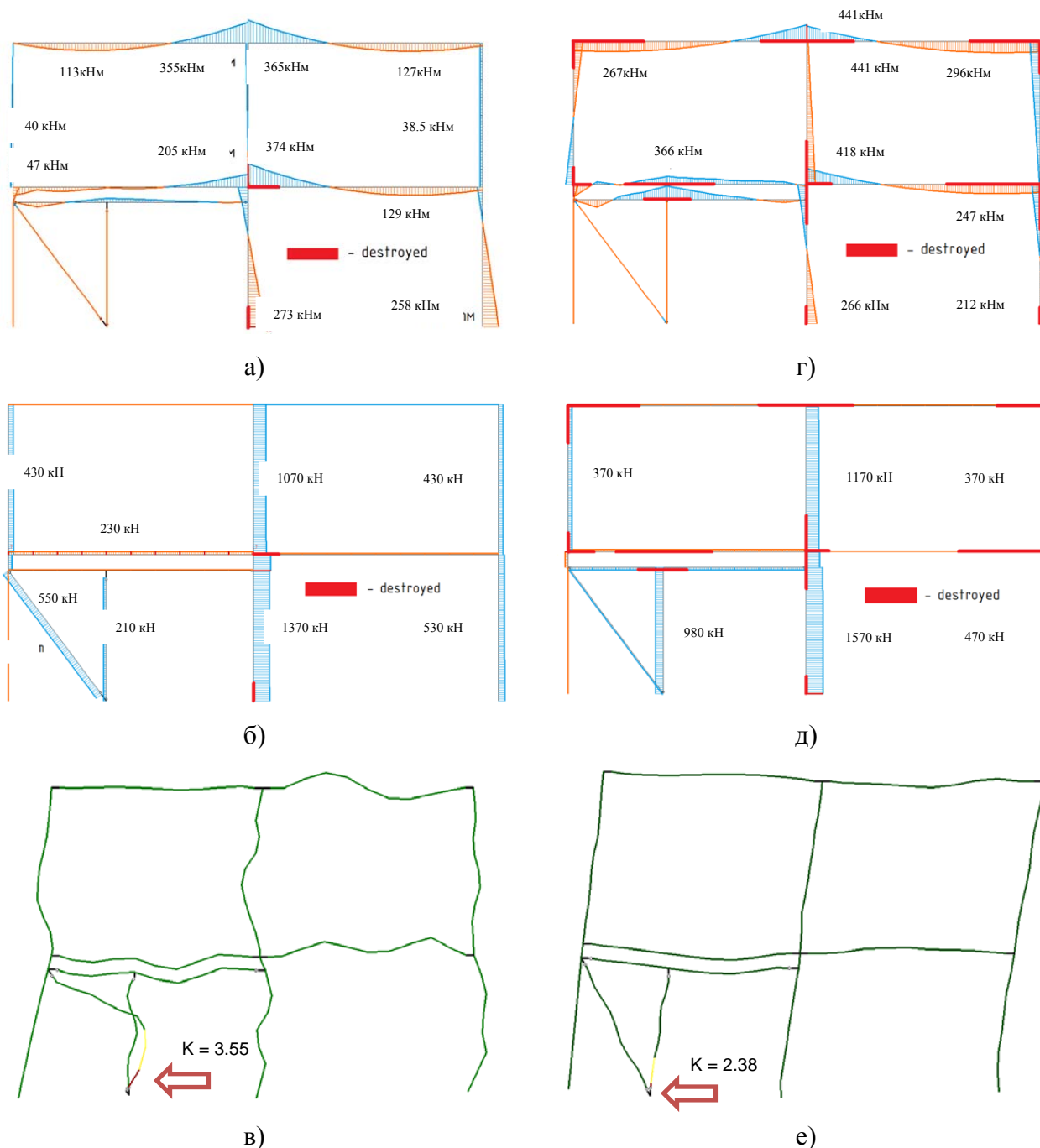


Рисунок 4 – Напряженно-деформированное состояние реконструированного железобетонного каркаса здания при аварийном выключении раскоса P-1 до момента появления первых разрушений во вторичной расчетной схеме (а, б, в) и в момент максимального динамического догружения (г, д, е): а, г) - эпюры изгибающих моментов; б, д) - эпюры продольных сил; в, е) - первая форма потери устойчивости

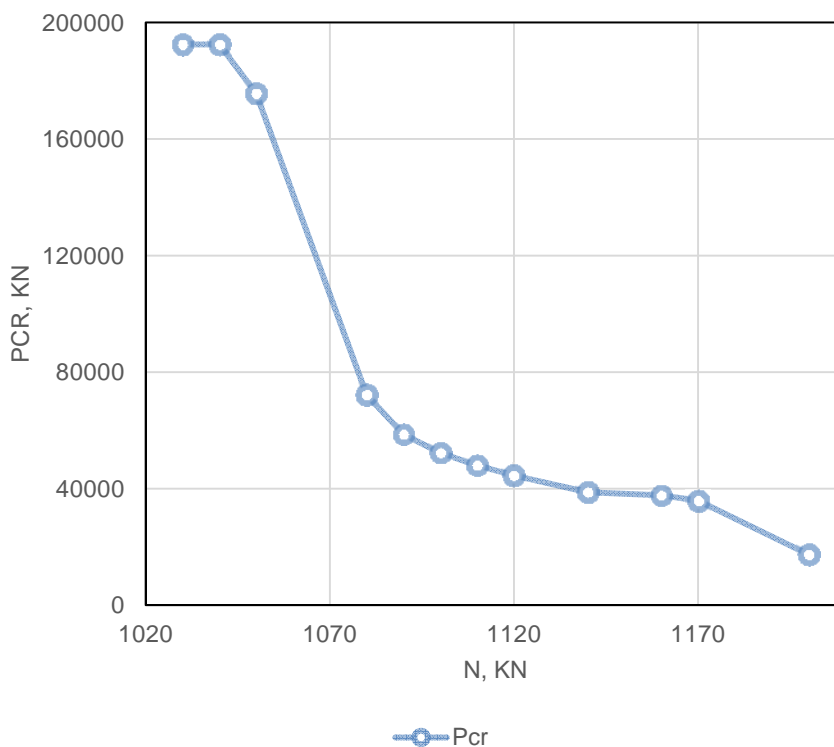


Рисунок 5 - График зависимости $P_{cr} - N$ для колонны среднего ряда

Из графика $P_{cr} - N$ видно, что величина критической силы нелинейно снижается по мере роста усилия в рассматриваемом элементе. Из анализа приведенных результатов также следует, что при увеличении начальной гибкости (гибкость в недеформированном состоянии) рассматриваемого конструктивного элемента возможен сценарий, при котором прогрессирующее обрушение системы будет вызвано потерей устойчивости, а не исчерпанием прочности в его опорном сечении.

Выводы

Проведенными исследованиями показано, что перепланировка или реконструкция эксплуатируемого здания, сопровождающаяся усилением его отдельных несущих элементов, может существенно изменить распределение силовых потоков в конструктивной системе не только на стадии нормальной эксплуатации, но и при внезапных структурных перестройках, вызванных гипотетическим удалением одного из несущих элементов.

Выполненный расчет по нелинейной деформационной модели и нелинейный расчет устойчивости деформированных состояний конструктивной системы показал, что в рассматриваемой системе при принятых жесткостях элементов усиления прогрессирующее обрушение связано с исчерпанием прочности несущего сжато-изгибаемого элемента. Однако при большей начальной гибкости конструктивных элементов возможен сценарий исчерпания несущей способности, связанный с потерей устойчивости. В связи с этим целесообразно использовать описанный вариант нелинейного расчета устойчивости деформированных состояний конструктивной системы в качестве дополнительного инструмента при оценке сопротивления каркасов зданий и сооружений прогрессирующему обрушению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». М.: Минстрой России, 2019. 33 с.
2. Wang Hao, Zhang Anqi, Li Yi, Yan Weiming. A Review on Progressive Collapse of Building Structures // *The Open Civil Engineering Journal*. 2014. 8(1). Pp. 183-192.
3. Shan L. et al. Robustness of RC buildings to progressive collapse: Influence of building height // *Eng. Struct.* Elsevier, 2019. Vol. 183, № August 2018. P. 690–701.
4. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms // *J. Perform. Constr. Facil.* Elsevier, 2018. Vol. 32, № 4. P. 04018043.
5. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2018. Vol. 18, № 03. P. 1850038.
6. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam–Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention // *J. Struct. Eng.* 2019. Vol. 145, № 5. P. 04019020.
7. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // *Eng. Struct.* 2010.
8. Marjanishvili S., Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *J. Perform. Constr. Facil.* 2006.
9. Marchand K., McKay A., Stevens D.J. Development and Application of Linear and Non-Linear Static Approaches in UFC 4-023-03 // *Struct. Congr.* 2009. 2009.
10. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Eng. Struct.* Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
11. Pantidis P., Gerasimidis S. New euler-type progressive collapse curves for steel frames // *Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2016, SSRC 2016*. Structural Stability Research Council (SSRC), 2016. P. 408–421.
12. Gerasimidis S. et al. Loss-of-stability induced progressive collapse modes in 3D steel moment frames // *Struct. Infrastruct. Eng.* 2015. Vol. 11, № 3.
13. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // *Mag. Civ. Eng.* 2018. Vol. 80, № 4. P. 73–80.
14. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4 (78). С. 42-52.
15. Определение параметров динамического догружения в арматуре растянутого железобетонного элемента / Н.В. Федорова, В.И. Колчунов, В.Т. Чемодуров, П.А. Кореньков // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 4 (370). С. 235-241.
16. Моделирование разрушения железобетонного каркаса многоэтажного здания с предварительно напряженными ригелями / В.И. Колчунов, Н.В. Федорова, С.Ю. Савин, В.В. Ковалев, Т.А. Ильющенко // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 8(92). С. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13
17. Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Бухтиярова А.С. Живучесть нагруженных и коррозионноповреждаемых рамно-стержневых железобетонных конструкций при внезапной потере устойчивости несущих элементов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 12. С. 42-47.
18. Колчунов В.И., Дьяков И.М., Гречишников С.В., Дьяков М.И. Способ усиления каркаса многоэтажного здания при неравномерных осадках фундаментов // *Строительство и реконструкция*. 2019. 5 (85). С. 63-73.
19. Гениев Г. А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов // *Бетон и железобетон*. 1992. № 9. С. 25-27.
20. Гениев Г.А. О динамических эффектах в стержневых системах из физически нелинейных хрупких материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 1999. № 9. С. 23-24.
21. Биргер И. А. Общие алгоритмы решения задач теорий упругости, пластичности и ползучести // *Успехи механики деформируемых сред*. – М. : Наука, 1975. – С. 51 – 73.

REFERENCES

1. Russian Building Code SP 385.1325800.2018 «Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proyektirovaniya. Osnovnyye polozheniya» [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Key Points]. Moscow: Minstroy Rossii, 2019. 33 p.
2. Wang Hao, Zhang Anqi, Li Yi, Yan Weiming. A Review on Progressive Collapse of Building Structures. *The Open Civil Engineering Journal*. 2014. 8(1). Pp. 183-192.
3. Shan L. et al. Robustness of RC buildings to progressive collapse: Influence of building height. *Eng. Struct. Elsevier*, 2019. Vol. 183, No August 2018. P. 690–701.

4. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms. *J. Perform. Constr. Facil. Elsevier*, 2018. Vol. 32, № 4. P. 04018043.
5. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2018. Vol. 18, No 03. P. 1850038.
6. Han Q. et al. Experimental Investigation of Beam–Column Joints with Cast Steel Stiffeners for Progressive Collapse Prevention. *J. Struct. Eng.* 2019. Vol. 145, No 5. P. 04019020.
7. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building. *Eng. Struct.* 2010.
8. Marjanishvili S., Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis. *J. Perform. Constr. Facil.* 2006.
9. Marchand K., McKay A., Stevens D.J. Development and Application of Linear and Non-Linear Static Approaches in UFC 4-023-03. *Struct. Congr.* 2009.
10. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct. Elsevier*, 2018. Vol. 173, No March. P. 122–149.
11. Pantidis P., Gerasimidis S. New euler-type progressive collapse curves for steel frames. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2016, SSRC 2016. Structural Stability Research Council (SSRC), 2016. P. 408–421.
12. Gerasimidis S. et al. Loss-of-stability induced progressive collapse modes in 3D steel moment frames. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2015. Vol. 11, No 3.
13. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Mag. Civ. Eng.* 2018. Vol. 80, No 4. P. 73–80.
14. Fedorova N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy deformirovaniya monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy pri avariynnykh vozdeystviyakh [The methodology of experimental studies of the deformation of monolithic reinforced concrete carcasses of buildings under emergency impacts]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No 4 (78). Pp. 42–52.
15. Fedorova N.V., Kolchunov V.I., Chemodurov V.T., Koren'kov P.A. Opredeleniye parametrov dinamicheskogo dogruzheniya v armature rastyanutogo zhelezobonnogo elementa [Determination of dynamic loading parameters in the reinforcement of a stretched reinforced concrete element]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2017. No 4 (370). Pp. 235–241.
16. Kolchunov, V.I., Fedorova, N.V., Savin, S.Yu., Kovalev, V.V., Iliushchenko, T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 92(8). Pp. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13
17. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' nagruzhennykh i korrozionnopovrezhdayemykh ramno-sterzhnevnykh zhelezobetonnykh konstruksiy pri vnezapnoy potere ustoychivosti nesushchikh elementov [Survivability of loaded and corrosion-damaged frame-rod reinforced concrete structures with a sudden loss of stability of load-bearing elements]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. No 12. Pp. 42–47.
18. Kolchunov V.I., D'yakov I.M., Grechishnikov S.V., D'yakov M.I. Sposob usileniya karkasa mnogoetazhnogo zdaniyapri neravnomernykh osadkakh fundamentov [he method of reinforcing the skeleton of a multi-story building with uneven precipitation of foundations]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. 5 (85). Pp. 63–73
19. Geniyev G. A. Ob otsenke dinamicheskikh effektov v sterzhnevnykh sistemakh iz khrupkikh materialov [On the estimation of dynamic effects in bar systems made of brittle materials]. *Beton i zhelezobeton*. 1992. No 9. Pp. 25–27.
20. Geniyev G.A. O dinamicheskikh effektakh v sterzhnevnykh sistemakh iz fizicheskii nelineynykh khrupkikh materialov [On dynamic effects in core systems of physically nonlinear brittle materials]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 1999. No 9. Pp. 23–24.
21. Birger I. A. Obshchiye algoritmy resheniya zadach teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [General algorithms for solving the problems of theories of elasticity, plasticity and creep]. Uspekhi mekhaniki deformiruyemykh sred [General algorithms for solving the problems of theories of elasticity, plasticity and creep]. Moscow : Nauka, 1975. Pp. 51 – 73.

Информация об авторах

Савин Сергей Юрьевич

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН», г. Москва, Россия,
кандидат технических доцент, инженер.
E-mail: suwin@yandex.ru

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
академик РААСН, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: asiorel@mail.ru

Ковалев Владислав Валерьевич

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений.
E-mail: slavutich_1991@mail.ru

Information about authors

Savin Sergey Yuryevich

Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow, Russia,
candidate of technical sciencesdocent, Engineer.
E-mail: suwin@yandex.ru

Kolchunov Vitaliy Ivanovich

South-West State University, Kursk, Russia,
academician of RAACS, Doctor of Engineering, professor, head of the department of unique building and structures,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: asiorel@mail.ru

Kovalev Vladislav V.

South-West State University, Kursk, Russia,
graduate student of the department of unique buildings and structures.
E-mail: slavutich_1991@mail.ru