



Исследование предпосылок влияния эксцентриситетов и отклонений осей на показатели напряженного-деформированного состояния железобетонных колонн в каркасах многоэтажных зданий

А.В. Ластовка¹, А.К. Мурзинцев²✉

^{1,2}Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. Целью работы является анализ вопросов, связанных с учетом особенностей определения параметров напряженно-деформированного состояния сжатых несущих элементов каркасных зданий. В материале освещены основные источники эксцентриситетов и причины их формирования, приведена характеристика различий поведения центрально и внецентренно сжатых железобетонных элементов. Также уделяется внимание вариантам распределения напряжений, как в поперечном сечении, так и по высоте внецентренно сжатых железобетонных элементов в зависимости от величины эксцентриситета. Проведенный анализ показал, что функциональная эффективность сжатых колонн каркаса напрямую зависит от первоначально установленных (запроектированных) показателей несущей способности, технологии и качества проведения соответствующих строительных процессов. Формирование эксцентриситетов и отклонений осей поперечного сечения для колонн каркаса является следствием недостаточного качества проектных решений (с учетом возможного проявления рассматриваемых явлений) и/или производства строительных работ. Учет проявлений эксцентриситетов и отклонений осей требует разработки специального алгоритма экспертизы фактических параметров напряженно-деформированного состояния и разработки комплекса мероприятий, необходимых для повышения показателей несущей способности колонн каркасов многоэтажных зданий. Предложенный в работе аналитический материал может быть использован при разработке методических рекомендаций по повышению несущей способности для внецентренно сжатых железобетонных колонн многоэтажных каркасных зданий.

Ключевые слова: железобетонные колонны, многоэтажные каркасные здания, сжатые несущие элементы, свойства бетона, эксцентриситет приложения нагрузки, параметры напряженно-деформированного состояния

Для цитирования: Ластовка А.В., Мурзинцев А.К. Исследование предпосылок влияния эксцентриситетов и отклонений осей на показатели напряженного-деформированного состояния железобетонных колонн в каркасах многоэтажных зданий // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-39-47>.

Original article

Exploring influence of eccentricities and axis deviations on stress and strain state of reinforced concrete columns in multi-story frame buildings

Anatoly V. Lastovka¹, Arsenii K. Murzintcev²✉

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The aim of this paper is to analyze the issues associated with the determination of parameters for stress and strain state of compression load-bearing elements in frame buildings. The paper highlights the main sources and causes of eccentricities, as well as the differences in the behavior of centrally and eccentrically loaded reinforced concrete elements. Particular attention was also paid to stress distributions both in cross-sectional and height direction of eccentrically loaded reinforced concrete elements depending on the eccentricity value. According to the conducted analysis, the functional

efficiency of compression columns of the framework depends directly on initially set (designed) parameters of bearing capacity, technology and quality of implementation of corresponding construction processes. The formation of eccentricities and deviations of cross-section axes for framing columns is a consequence of insufficient design solutions (taking into account possible manifestations of the phenomena under consideration) and/or construction works. In order to consider eccentricities and axis deviations, the special algorithm should be developed to examine the actual parameters of the stress and strain state. Moreover, a set of measures should be introduced to increase the indicators of bearing capacity of columns for frameworks of multi-story buildings. The paper provides the analytical data which can be used in the development of guidelines for improving the bearing capacity for eccentrically loaded reinforced concrete columns of multi-story frame buildings.

Keyword: reinforced concrete columns, multi-storey frame buildings, compressed load-bearing elements, concrete properties, load application eccentricity, parameters of the stress-strain state

For citation: Lastovka A.V., Murzintsev A.K. Exploring influence of eccentricities and axis deviations on stress and strain state of reinforced concrete columns in multi-story frame buildings. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-39-47>.

ВВЕДЕНИЕ

Случайный эксцентриситет. Особенности железобетона как композиционного материала

Случайный эксцентриситет – эксцентриситет продольной сжимающей силы, причинами возникновения которого могут быть:

- неоднородность свойств бетона по сечению при значительной высоте сечения и подвижной консистенции бетона;
- начальная кривизна оси сжатого элемента или ее отклонение от вертикали;
- неучтенные горизонтальные силы и другие причины.

Из-за неоднородности структуры бетона внешняя нагрузка создает в нем сложное напряженное состояние. В подвергнутом сжатию бетонном образце напряжения концентрируются на более жестких частицах, обладающих большим модулем упругости, вследствие чего по плоскостям соединения этих частиц возникают усилия, стремящиеся нарушить их связь. В результате в таком образце кроме продольных сжимающих напряжений возникают и поперечные растягивающие напряжения. Неоднородность бетона может отрицательно повлиять на эксплуатационные свойства железобетонных изделий.

Основные источники и причины формирования эксцентриситетов и смещений осей колонн каркаса

Характер работы сжатых вертикальных железобетонных несущих элементов каркаса зависит от их высоты (определяется проектной высотой этажа), способом поэтажного деления и видом закрепления концов (низа и верха железобетонной колонны): жестким, шарнирным или свободным. Эти условия учитываются в расчетах введением специального значе-

ния расчетной длины сжатого элемента l_0 [1].

На рис. 1 и 2 представлены примеры армирования поперечного сечения вертикального несущего железобетонного элемента при центральном и внецентренном сжатии (при наличии эксцентриситета e_0 приложения продольного усилия).

В условиях приложения центрального сжимающего усилия продольная рабочая арматура (A_s) функционирует равномерно на сжатие, поэтому наиболее рациональным способом является ее размещение по всему периметру поперечного сечения, а форма сечения – квадратная ($h = b$, рис. 1).

При внецентренном приложении сжимающего усилия основная продольная рабочая арматура (A'_s) располагается вдоль короткой стороны h поперечного сечения прямоугольной формы ($h < b$, рис. 2).

Именно короткая сторона h становится перпендикулярной по отношению к направлению действия изгибающего момента, вызванного проявлением эксцентриситета e_0 приложения продольного сжимающего усилия N . При больших значениях эксцентриситета e_0 часть рабочей арматуры A'_s , которая находится на стороне, противоположной эксцентриситету, может оказаться в растянутой зоне поперечного сечения железобетонной колонны.

Проектирование показателей несущей способности вертикальных несущих элементов каркаса сводится к определению формы и размеров поперечного сечения, назначению класса бетона и определению площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры (A_s и A'_s), в зависимости от предполагаемого характера приложения сжимающего усилия (возможности проявления эксцентриситета) [2–9].

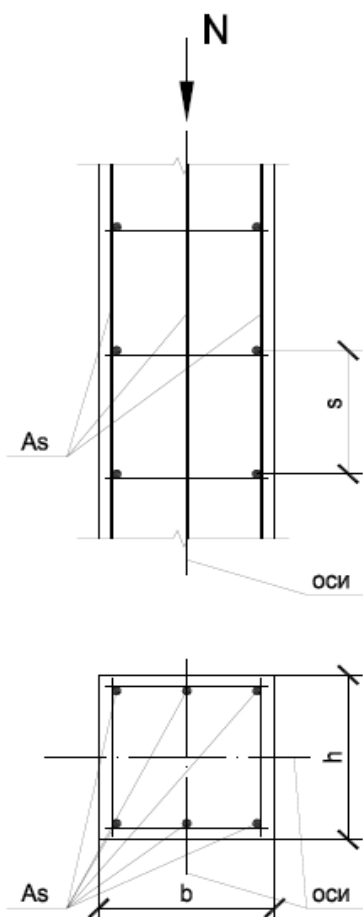


Рис. 1. Способ армирования поперечного сечения несущего вертикального элемента при центральном сжатии

Fig. 1. Method of reinforcement of the cross-section of the bearing vertical element with central compression

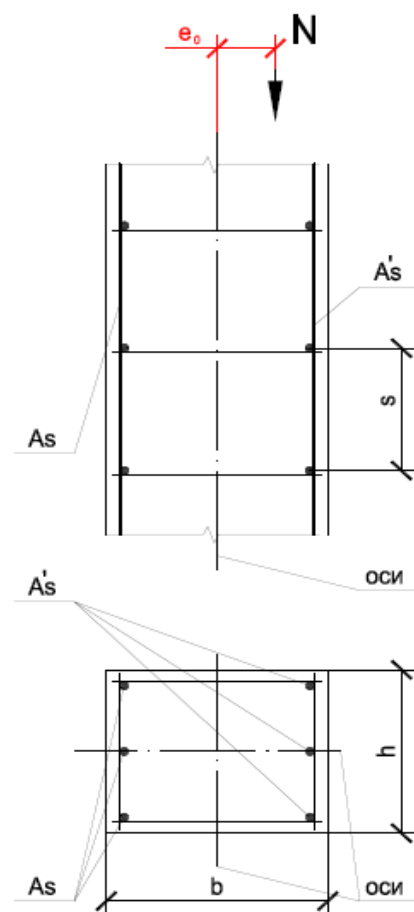


Рис. 2. Способ армирования поперечного сечения несущего вертикального элемента при внецентренном сжатии

Fig. 2. Method of reinforcement of the cross-section of the bearing vertical element with off-center compression

На рис. 3 представлены сборные железобетонные колонны поэтажной разбивки (в составе конструктивной системы многоэтажного здания), которые находятся в условиях центрального и внецентренного сжатия, в зависимости от приложения продольного усилия N :

- колонны проектных марок К-1 и К-3 (центральных рядов, по осям Б, В) – центрально сжатые элементы;

- колонны проектных марок К-2 и К-4 (крайних рядов, по осям А, Г) – внецентренно сжатые элементы.

Главная особенность конструирования центрально и внецентренно сжатых сборных железобетонных колонн каркаса многоэтажного здания состоит в их разделении на однотипные элементы, характеризующиеся простой формой, схемой армирования. Такие конструктивные элементы многоэтажных зданий (смонтированные из отдельных элемен-

тов), включаются в совместную работу по восприятию сжимающих усилий при помощи организации стыков вида: «низ колонны – верх колонны».

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Характеристика различных поведения центрально и внецентренно сжатых железобетонных конструктивных элементов

Колонны многоэтажных каркасных зданий работают в условиях воздействия внешней сжимающей нагрузки N (продольного усилия), приложенной с некоторым значением эксцентриситета e_0 (рис. 4). При рассмотрении обоих возможных вариантов приложения нагрузки сочетание осевого сжимающего усилия (или усилия со случайным эксцентриситетом e_0) и изгибающего момента (рис. 4, а) возможно заменить равнодействующей сжимающей силой, действующей с эксцентриситетом: $e_{0N} = M/N$ и наоборот (рис. 4, б).

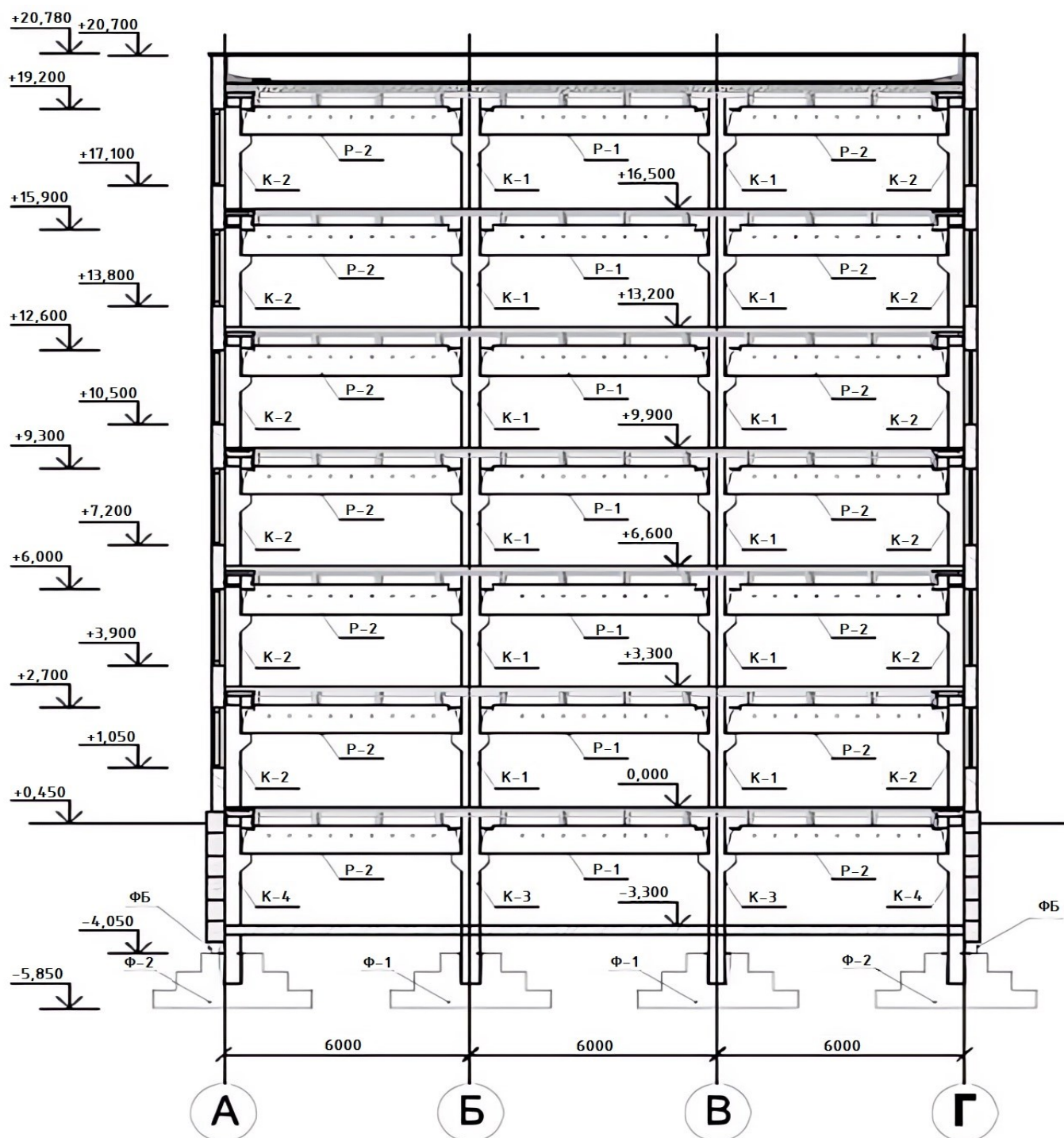


Рис. 3. Каркасная конструктивная система многоэтажного здания с применением сборных железобетонных колонн поэтажной разбивки
Fig. 3. Frame structural system of a multi-storey building with the use of precast reinforced concrete columns of floor-by-floor breakdown

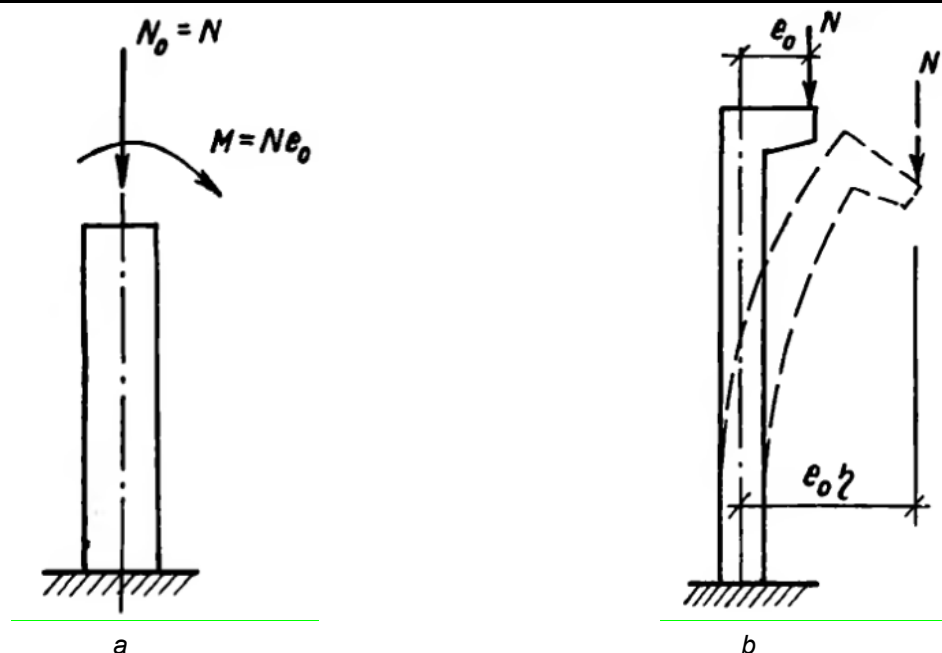


Рис. 4. Внецентренно сжатые колонны железобетонного каркаса:

a – на колонну действует продольная сила N , приложенная без эксцентриситета e_0 и изгибающий момент M ;

b – на колонну действует продольная сила N , приложенная с эксцентриситетом e_0

Fig. 4. Out-of-center compressed columns of a reinforced concrete frame:

a – a longitudinal force N applied without eccentricity e_0 and a bending moment M acts on the column;

b – a longitudinal force N applied with an eccentricity of e_0 acts on the column;

Примером внецентренно сжатого конструктивного элемента каркаса является расположение в конструктивной системе многоэтажного здания колонн проектных марок К-2 и К-4 (крайних рядов, по осям А, Г, см. рис. 3), воспринимающих дополнительную нагрузку от ветровых воздействий и собственного веса навесных самонесущих железобетонных стеновых панелей.

Внецентренная нагрузка на сжатые железобетонные конструктивные элементы каркаса может быть также следствием проявлений случайных эксцентриситетов, вызванных неточной установкой сборных элементов в проектное положение или неоднородностью бетонной смеси, укладываемой в конструкцию монолитной железобетонной колонны.

На рис. 5 приведены основные расчетные схемы определения параметров напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых конструктивных элементов прямоугольной формы поперечного сечения¹.

Вариант 1 (см. рис. 5, а). Приведена проектная ситуация с использованием внецентренно сжатой колонны (прямоугольного се-

чения) и продольной (сжимающей) нагрузкой N , которая приложена к рассматриваемому несущему элементу со значительным эксцентриситетом e_0 . При этом конструктивное решение (для случая значительной величины эксцентриситета) не предусматривает применения избыточного армирования сечения растянутой арматурой. Предельное состояние характеризуется достижением растянутой рабочей арматурой предела текучести стали.

Вариант 2 (см. рис. 5, б). Приведена проектная ситуация с использованием внецентренно сжатой колонны (прямоугольного сечения) и продольной (сжимающей) нагрузкой N , приложенной к рассматриваемому несущему элементу с незначительным эксцентриситетом e_0 . При этом конструктивное решение (для случая незначительной величины эксцентриситета) допускает применение избыточного армирования сечения растянутой арматурой. Предельное состояние характеризуется разрушением бетона сжатой зоны сечения без образования и развития участков растяжения.

¹Краснощекоев Ю.В. Научные основы исследований взаимодействия элементов железобетонных конструкций: дисс. ... д-ра техн. наук. 05.23.01. Омск, 2001. С. 342.

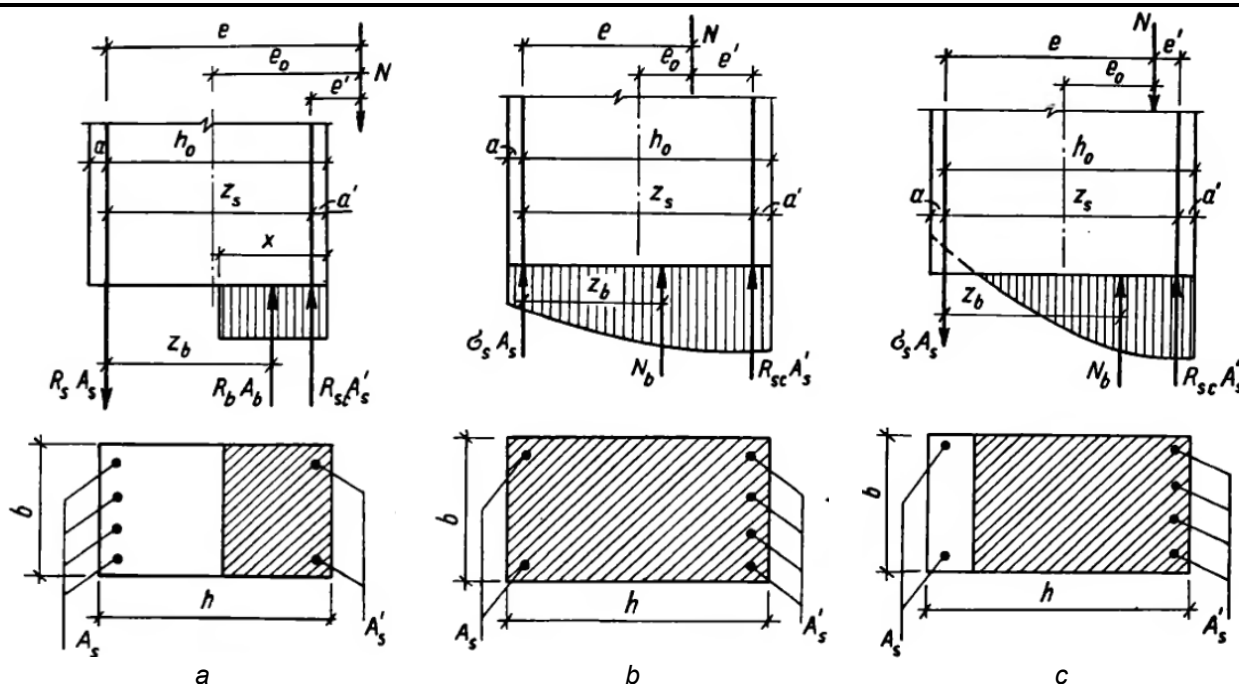


Рис. 5. Основные схемы расчета сечений внецентренно сжатых элементов прямоугольной (квадратной) формы

Fig. 5. Basic schemes for calculating cross sections of non-centrally compressed rectangular (square) elements

Вариант 3 (см. рис. 5, с). Приведена проектная ситуация с использованием внецентренно сжатой колонны (прямоугольного сечения) и продольной (сжимающей) нагрузкой N , приложенной с незначительным эксцентриситетом e_0 . При этом конструктивное решение (для случая малой величины эксцентриситета) допускает применение избыточного армирования сечения растянутой арматурой. Предельное состояние характеризуется разрушением бетона сжатой зоны сечения с одновременным образованием и развитием участков растяжения, а растянутая или менее сжатая арматура в достигнутом предельном состоянии остается недоиспользованной.

Таким образом, можно отметить, что прочность внецентренно сжатого конструктивного элемента для случаев больших эксцентриситетов является зависимой от состояния растянутой рабочей арматуры, а для случаев малых эксцентриситетов – от прочности бетона на сжатие² [10-12].

Распределение напряжений по высоте (длине) сжатого элемента

На рис. 6 представлены возможные варианты распределения напряжений по высоте железобетонного, внецентренно сжатого кон-

структивного элемента:

– на рис. 6, а представлена расчетная схема, когда по всей высоте железобетонного, внецентренно сжатого конструктивного элемента возникают исключительно сжимающие усилия, а растянутая зона полностью отсутствует;

– на рис. 6, б представлена расчетная схема, когда по высоте железобетонного, внецентренно сжатого конструктивного элемента возникают как сжимающие, так и растягивающие усилия;

– на рис. 6, с представлена расчетная схема, когда по высоте железобетонного, внецентренно сжатого конструктивного элемента имеются участки с растягивающими усилиями.

Первый из рассмотренных вариантов (см. рис. 6, а) распределения напряжений характерен для анализа центрально нагруженных железобетонных колонн или внецентренно нагруженных несущих элементов с малыми значениями эксцентриситета e_0 и/или небольшими значениями гибкости λ .

Второй из рассмотренных вариантов (см. рис. 6, б) распределения напряжений характерен для анализа внецентренно нагруженных несущих элементов с большими значениями эксцентриситета e_0 . В растянутых

²Мордовский С. С. Совершенствование расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов: дисс. ... д-ра техн. наук. 05.23.01. Казань, 2013. С. 214.

зонах возможно проявление и развитие трещин. В случае возникновения и роста трещин требуется дополнительная проверка несущей способности внецентренно сжатого элемента по прогибам.

Третий из рассмотренных вариантов (см. рис. 6, с) распределения напряжений ха-

рактерен для анализа внецентренно нагруженных несущих элементов, у которых эксцентриситет приложения внешнего продольного усилия расположен в крайней точке ядра приведенного поперечного сечения сжатого конструктивного элемента или весьма близко к ней со стороны центра тяжести [13].

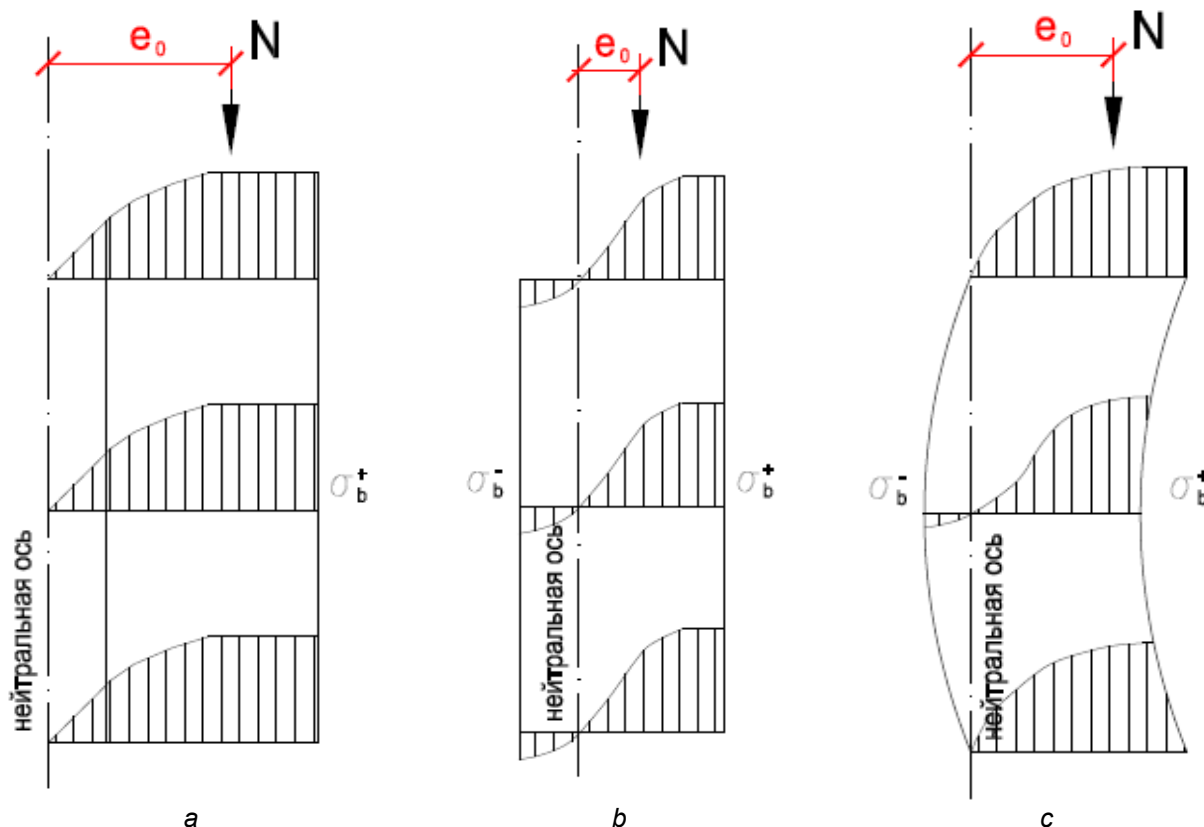


Рис. 6. Варианты распределения напряжений по высоте (длине) сжатого несущего элемента
Fig. 6. Variants of stress distribution along the height (length) of the compressed carrier element

ВЫВОДЫ

Предпосылки формирования эксцентриситетов отклонений осей вызванных неудовлетворительным качеством проектных решений и строительно-монтажных работ, неоднородностью бетонной смеси являются актуальными для разработки специального алгоритма экспертизы фактических парамет-

ров напряженно-деформированного состояния и разработки комплекса мероприятий, необходимых для повышения показателей несущей способности колонн каркасов многоэтажных зданий. Так как даже небольшой эксцентриситет ощутимо снижает несущую способность сжатого элемента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом: монография. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 352 с.
2. Веретенников В.И., Бармотин А.А. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии // Бетон и железобетон. 2000. № 5. С. 27–30.
3. Залесов А.С., Чистяков Е.А., Ларичева И.Ю.

- Диформационная расчетная модель железобетонных элементов при воздействии изгибающих моментов и продольных сил // Бетон и железобетон. 1996. № 5. С. 16–18.
4. Маилан Д.Р. Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона. Ростов н/Д.: РИСИ. 1979. С. 70–82.
5. Rings F. Reinforced Concrete, Theory and Practice (Classic Reprint). London: Forgotten Books, 2017. 248 p.

6. Danchenko T., Lastovka A., Amelchugov S., Klinduh N., Berseneva M. A variety of designs construction and mounting // *Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019): E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 135. P. 02022.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913502022>.
7. Lastovka A., Danchenko T., Petukhova I., Polyakov I. Nanotechnologies in the Field of Concrete Production // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 510. P. 1573–1582.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_162.
8. Ластовка А.В., Данченко Т.В., Петухова И.Я., Поляков И.А.. Нанотехнологии в области производства бетона // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2022. Т. 12. № 3. С. 338–349.
9. Ластовка А.В. Проблематика проектирования железобетонных конструкций // *Восточно-европейский научный журнал*. 2019. № 48.

С. 55–60.
10. Галустов К.З. Решение задачи о перераспределении напряжений между арматурой и бетоном во времени // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1985. № 6.
11. Никулин А.И., Аль-Хаваф А.Ф.К. О построении методики расчета прочности внецентренно сжатых с малыми эксцентриситетами железобетонных элементов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 6. С. 48–53.
12. Ластовка А.В., Иванова А.В. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной арматуры // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2022. Т. 12. № 2. С. 174–181.
13. Majewski T., Bobinski J., Tejchman J. FE analysis of failure behaviour of reinforced concrete columns under eccentric compression // *Engineering Structures*. 2008. Т. 30. № 2. С. 300–317.

REFERENCES

1. Kodysh E.N., Trekin N.N., Nikitin I.K. Design of multi-storey buildings with reinforced concrete frame. M.: Association of Construction Universities; 2009. 352 p. (In Russ.).
2. Veretennikov V.I., Barmotin A.A. On the influence of the size and shape of the cross-section of elements on the diagram of concrete deformation during off-center compression. *Beton i zhelezobeton*. 2000;5:27-30. (In Russ.).
3. Zalesov A.S., Chistyakov E.A., Laricheva I.Yu. Deformation calculation model of reinforced concrete elements under the influence of bending moments and longitudinal forces. *Beton i zhelezobeton*. 1996;5:16-18. (In Russ.).
4. Mailyan D.R. Issues of strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete. Rostov on Don: RISI; 1979. p. 70-82. (In Russ.).
5. Rings F. Reinforced Concrete, Theory and Practice (Classic Reprint). London: Forgotten Books; 2017. 248 p.
6. Danchenko T., Lastovka A., Amelchugov S., Klinduh N., Berseneva M. A variety of designs construction and mounting. *Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019): E3S Web of Conferences*. 2019;135:02022.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913502022>.
7. Lastovka A., Danchenko T., Petukhova I., Polyakov I. Nanotechnologies in the Field of Concrete Production. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;510:1573-1582.
8. Lastovka A.V., Danchenko T.V., Petukhova I.Ya., Polyakov I.A. Nanotechnologies in concrete production. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo*.

Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2022;12(3):338-349. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-338-349>.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_162.
9. Lastovka A.V. Problematics of designing reinforced concrete structures. *Vostochno-evropeiskii nauchnyi zhurnal = Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe = East European Scientific Journal*. 2019;48:55-60. (In Russ.).
10. Galustov K.Z. Solving the problem of stress redistribution between reinforcement and concrete in time. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1985;6. (In Russ.).
11. Nikulin A.I., Al-Havaff A.F.K. About the formation of the strength calculation method of the eccentrically loaded reinforced concrete elements with small excentricity. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2017;6:48-53. (In Russ.).
12. Lastovka A.V., Ivanova A.V. Simulation of combined action of reinforcement and concrete on the example of composite reinforcement. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(2):174-181. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-174-181>.
13. Majewski T., Bobinski J., Tejchman J. FE analysis of failure behaviour of reinforced concrete columns under eccentric compression. *Engineering Structures*. 2008;30(2):300-317.

Информация об авторах

Ластовка Анатолий Васильевич,
к.т.н., доцент, доцент кафедры
строительных конструкций и управляемых
систем,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,
Россия,
e-mail: last_pro@mail.rumailto:office@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

Мурзинцев Арсений Константинович,
магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,
Россия,
e-mail: arseniimurzincev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8378-7408>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.11.2022.
Одобрена после рецензирования 15.12.2022.
Принята к публикации 19.12.2022.

Information about the authors

Anatoly V. Lastovka,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Building
Structures and Controlled Systems,
Siberian Federal University,
79 Svobodny Ave., 660041, Krasnoyarsk,
Russia,
e-mail: last_pro@mail.rumailto:office@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

Arsenii K. Murzintcev,
Master Degree Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny Ave., 660041 Krasnoyarsk,
Russia,
e-mail: arseniimurzincev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8378-7408>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 21.11.2022.
Approved after reviewing 15.12.2022.
Accepted for publication 19.12.2022.