

УДК – 624.012.35

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

О кручении несимметричных несущих систем многоэтажных зданий

В.А. Люблинский^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

*LyublinskiyVA@mgsu.ru

Ключевые слова: многоэтажные здания, кручение, центр жесткостей, центр масс, несущая способность

История статьи

Поступила в редакцию: 22.10.2022

Доработана: 26.10.2022

Принята к публикации: 07.11.2022

Для цитирования

Люблинский В.А. О кручении несущих систем многоэтажных зданий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 37–45.

Аннотация. Несимметричное расположение в плане вертикальных несущих элементов, лестнично-лифтовых узлов, ядер жесткости приводит к появлению эксцентриситета между центром масс и центром жесткостей. В дальнейшем при действии горизонтальной нагрузки в несимметричных несущих системах возникает кручение. В данной работе рассматривается сопротивление многоэтажных зданий при возникновении кручения, вызванного несимметричным расположением вертикальных несущих элементов. Объектом исследования являлась несущая система жилого монолитного многоэтажного здания с неявно несовпадающим центром масс и центром жесткостей. Численным моделированием на горизонтальную нагрузку определено напряженно-деформированное состояние вертикальных железобетонных конструкций. Определено изменение усилий и перемещений в пилонах при кручении многоэтажного здания. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при проектировании сжато-изгибаемых железобетонных конструкций подверженных кручению.

On the Torsion of Asymmetric Bearing Systems of Multi-Storey Buildings

V.A. Lyublinskiy^{1*}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation

*LyublinskiyVA@mgsu.ru

Keywords: multi-storey buildings, torsion, center of stiffness, center of mass, load capacity

Abstract. Asymmetric arrangement in the plane of vertical bearing elements, ladders, stiffness elements is to the occurrence of eccentricity between center of rigidity and center of mass. Later, under the action of a horizontal load, torsion occurs in asymmetric load-bearing systems. This paper considers the resistance of multi-storey buildings during torsion caused by an asymmetric arrangement of vertical load-bearing objects.

Люблинский Валерий Аркадьевич, к.т.н., профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 1482-2672, Scopus: 57214072953, ResearcherID: AAA-6531-2022, ORCID: 0000-0001-9603-1730, E-mail: LyublinskiyVA@mgsu.ru

Lyublinskiy Valery, Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 0000-0001-9603-1730, Scopus: 57214072953, ResearcherID: AAA-6531-2022, ORCID: 0000-0001-9603-1730, E-mail: LyublinskiyVA@mgsu.ru

© Люблинский В.А., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Article history

Received: 22.10.2022

Revised: 26.10.2022

Accepted: 07.11.2022

For citation

Lyublinskiy V.A. On the Torsion of Asymmetric Bearing Systems of Multi-Storey Buildings. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1):37–45.

The object of the study was the carrier system of a residential monolithic multi-storey building with an implicitly non-coinciding center of rigidity and center of mass. Numerical simulation for a horizontal load determined the stress-strain state of vertical reinforced concrete structures. The change in forces and displacements in the pylons during the torsion of a multi-storey building is obtained. The results of the analysis carried out can be used in the design of compressed and bending reinforced concrete structures subject to torsion.

ВВЕДЕНИЕ

В несимметричных несущих системах при несовпадении центра жесткостей и центра масс возникает кручение. И хотя элементы жесткости работают в своей плоскости, вертикальные связи между ними, работающие на сдвиг, и диски перекрытий при кручении создают сложное напряженно-деформированное состояние в железобетонных конструкциях. По сути, дополнительная нагрузка создает иное напряженное состояние железобетонных конструкций по сравнению с регулярными структурами.

Пилоны, диафрагмы жесткости, ядра жесткости сопротивляются изгибу со стесненным кручением [1]. При несовпадении центра масс и центра жесткостей в многоэтажных зданиях при действии горизонтальной нагрузки и гораздо в меньшей степени при действии вертикальной нагрузки возникает кручение [1-5], (см. рис. 1). Горизонтальная нагрузка как ветровая, так и сейсмическая являются динамическими нагрузками.

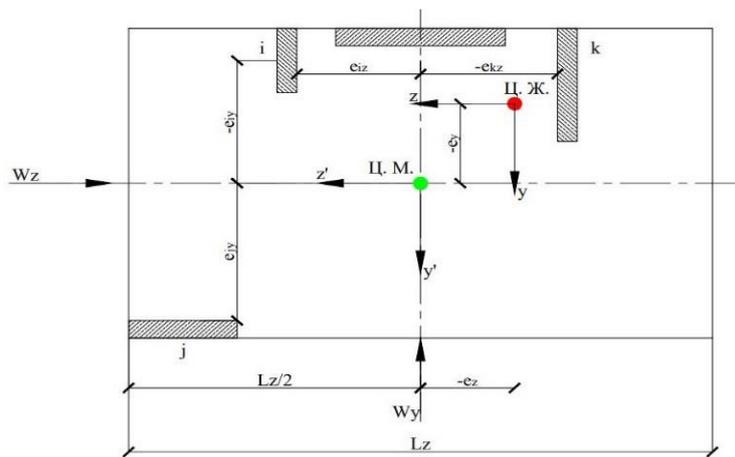


Рис. 1. Возникновение кручения в плане здания
Figure 1. The occurrence of torsion in the building plan

Координаты центра поворота или центра жесткостей определены по следующим зависимостям [1]:

$$e_y = \frac{\sum_{i=1}^n B_{iy} e_{iy}}{\sum_{i=1}^n B_{iy}} \quad (1)$$

$$e_z = \frac{\sum_{i=1}^n B_{iz} e_{iz}}{\sum_{i=1}^n B_{iz}}$$

где $B_{iy} = (EI_y)_i$, $B_{iz} = (EI_{xz})_i$ – изгибные жесткости элемента i относительно его собственных центральных осей, параллельных координатным осям Y и Z ;

e_{iy} , e_{iz} – координаты центра поперечного сечения элемента i относительно осей Y и Z .

При формировании несущей системы для увеличения изгибной жесткости целесообразно элементы жесткости располагать симметрично в плане относительно двух осей Y и Z и как можно

дальше от центра масс. Диафрагмы жесткости можно разместить по торцам зданий или на возмозной дальней периферии несущей системы. Вместе с тем при возникновении кручения именно эти элементы будут подвергнуты в лучшем случае дополнительным изгибающим моментам, величина которых будет зависеть от величины кручения перекрытий и места расположения несущего элемента относительно центра масс. В случае несимметричного расположения элементы жесткости, включая ядра жесткости, изгибаются и скручиваются [2,6,7]. Внешний изгибающий момент воспринимается сопротивлением этих конструкций изгибу, а внешний крутящий момент – их сопротивлению чистому и изгибному кручению. Плоские диафрагмы жесткости практически не сопротивляются чистому кручению.

И ветровая нагрузка и тем более сейсмическая, могут привести близости крутильных колебаний к низшим формам колебаний [4,10]. Появляются дополнительные инерционные силы. Динамическое воздействие ветра или сеймики может создать дополнительные напряжения в несущих конструкциях здания [9] и к перенапряжению торцевых периферийных элементов несущей системы. Снижение возмозжного кручения возмозжно за счет эффективной работы ядер жесткости в составе лестнично-лифтовых узлов.

Кручение зданий при действии сейсмической нагрузки или ветровой нагрузки не сопровождается анализом крутильных форм колебаний, не содержатся сведения о крутильной жесткости несущих железобетонных конструкций, что наряду с предложениями [11] является стимулом дальнейших исследований. Следует заметить, что при кручении ядро-диафрагменных систем возникает депланация поперечного сечения конструкций [1], которая очевидно влияет на трещиностойкость, а далее жесткость вертикальных конструкций. Диски перекрытий вращаются относительно центра жесткостей и очевидно, что кривая кручения является пространственной кривой и изменение жесткости находится в функции высоты здания. Связи сдвига, создающие пространственную несущую систему, работают не только в условиях некоторого одноосного напряженного состояния [12,13], но и подвергаются дополнительному воздействию в виде кручения. В монолитных конструкциях при изгибе и сжатии в поперечных сечениях конструкций может возникнуть крутящий момент, приводящий к сложному напряженно-деформированному состоянию [14,15], которое при сейсмическом воздействии сопоставим с условиями [16, 17].

В данной работе в первом приближении численным моделированием была рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния вертикальных железобетонных конструкций наиболее отдаленных от центра масс несущей системы. В качестве объекта исследования использовалась реальная несущая система и тестовые несущие системы.

МЕТОД

Для оценки влияния кручения на несущие системы зданий проведены параметрические исследования на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса LIRA, аналогичные работе [4]. На рисунках 2-5 показаны типичные несущие конструкции каркаса с несимметричным расположением диафрагм жесткости. Шаг колонн принят 6 по двум осям. Колонны приняты сечением 40x40 см, балки – 30x40 см, стенки жесткости приняты толщиной 20 см. Высота этажа принята 3 м, количество этажей – 20. Бетон принят – В25, арматура класса А500. Здание находится в III ветровом районе, ветровое давление – 0,38 КПа, тип местности - А.

Колонны и ригеля моделировались линейными конечными элементами, а плиты перекрытий и стенки жёсткости конечными элементами оболочки.

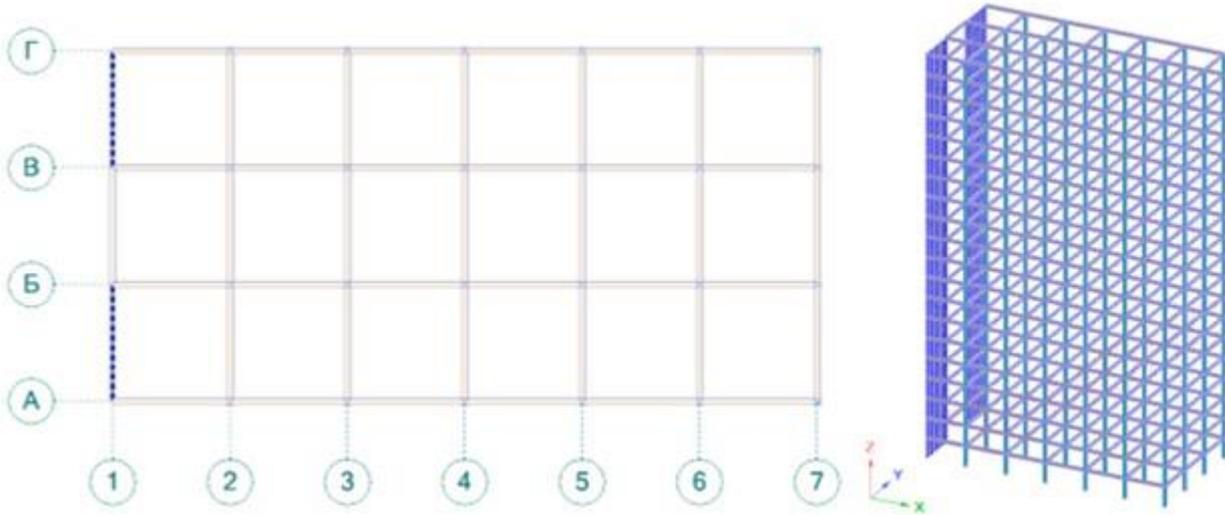


Рис. 2. Расчетная схема 1. Диафрагмы жесткости по оси 1
Figure 2. Calculation scheme 1. Stiffness diaphragms along axis 1

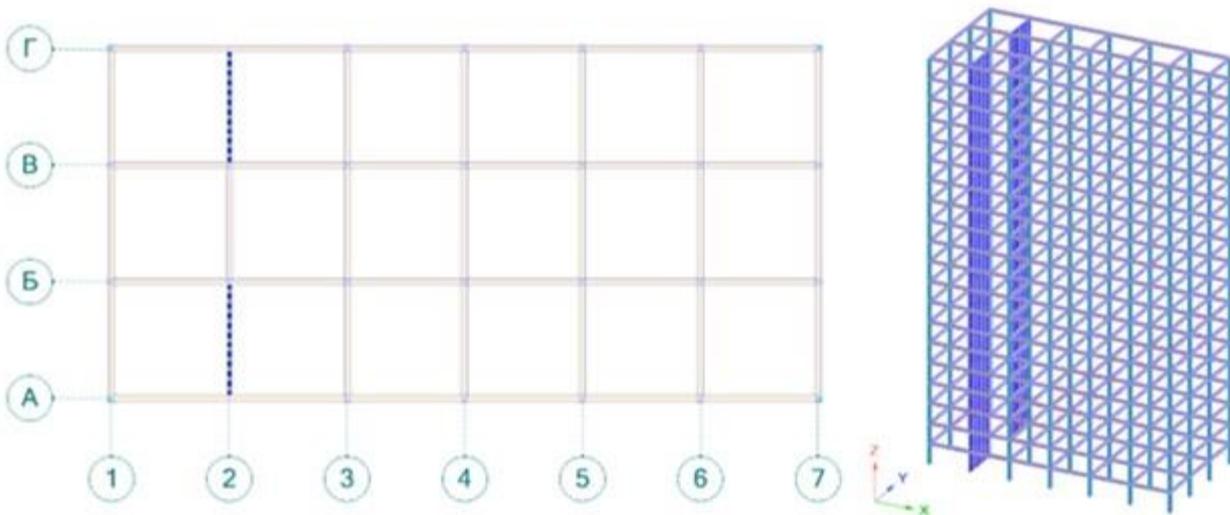


Рис. 3. Расчетная схема 2. Диафрагмы жесткости по оси 2
Figure 3. Calculation scheme 2. Stiffness diaphragms along the axis 2

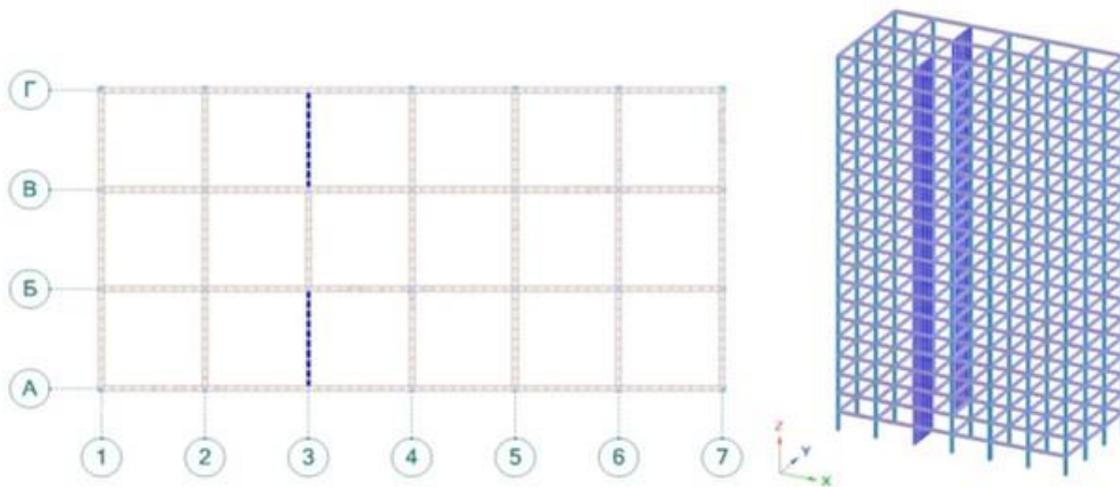


Рис. 4. Расчетная схема 3. Диафрагмы жесткости по оси 3
Figure 4. Calculation scheme 3. Diaphragms of rigidity along the axis 3

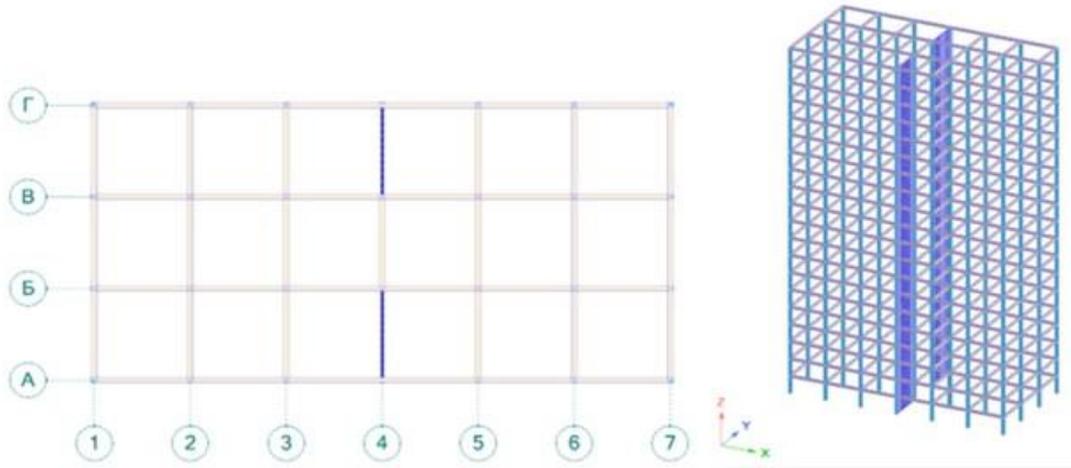


Рис. 5. Расчетная схема 4. Диафрагмы жесткости по оси 4
Figure 5. Calculation scheme 4. Rigidity diaphragms along the axis 4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сопротивления представленных выше несущих систем получены усилия в вертикальных конструкциях и перемещения в рассматриваемых схемах. Максимальное смещение центра жесткостей составило 0.386 м. Но и этот эксцентриситет привел к значительному увеличению горизонтальных перемещений несущих систем и углов поворота (рисунки 7-9).

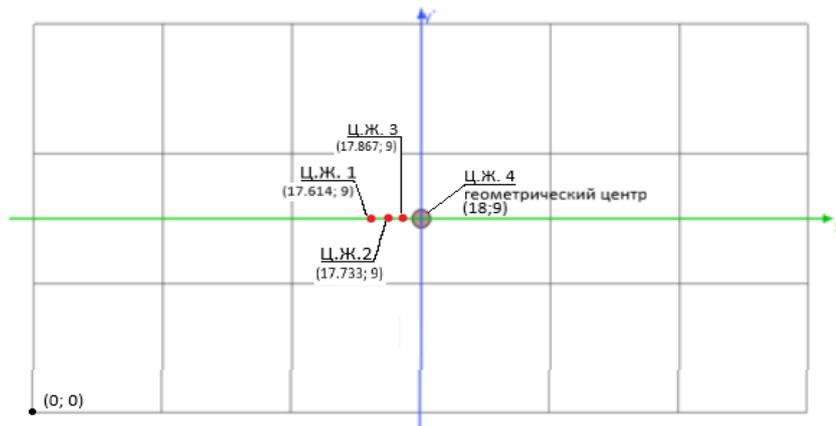


Рис. 6. Координаты центра жесткостей по схемам 1-4 соответственно
Figure 6. Coordinates of the stiffness center according to schemes 1-4, respectively

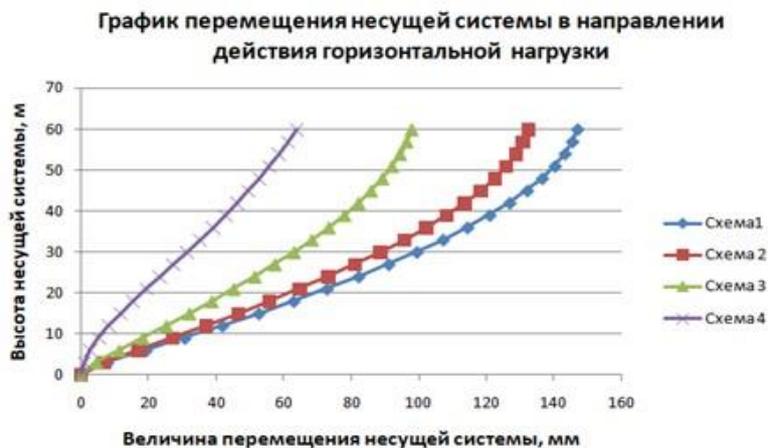


Рис. 7. Перемещения несущих систем в направлении действия горизонтальной нагрузки
Figure 7. Movements of carrier systems in the direction of the horizontal load

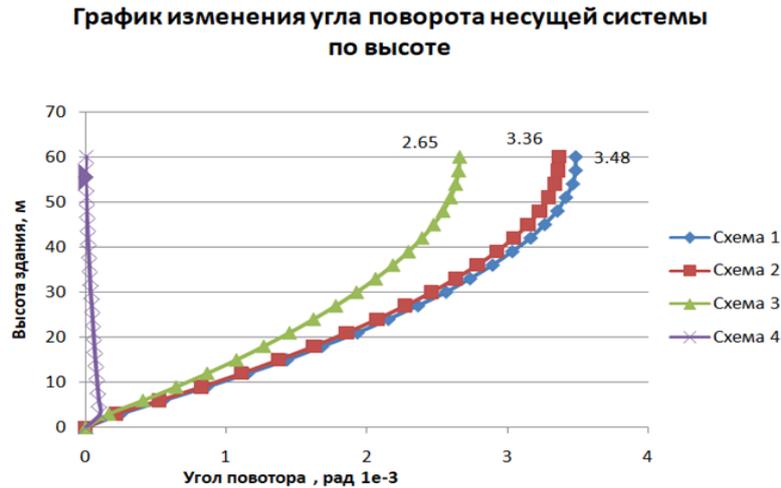


Рис. 8. Изменения угла поворота перекрытий по высоте здания
Figure 8. Changes in the angle of rotation of the floors along the height of the building

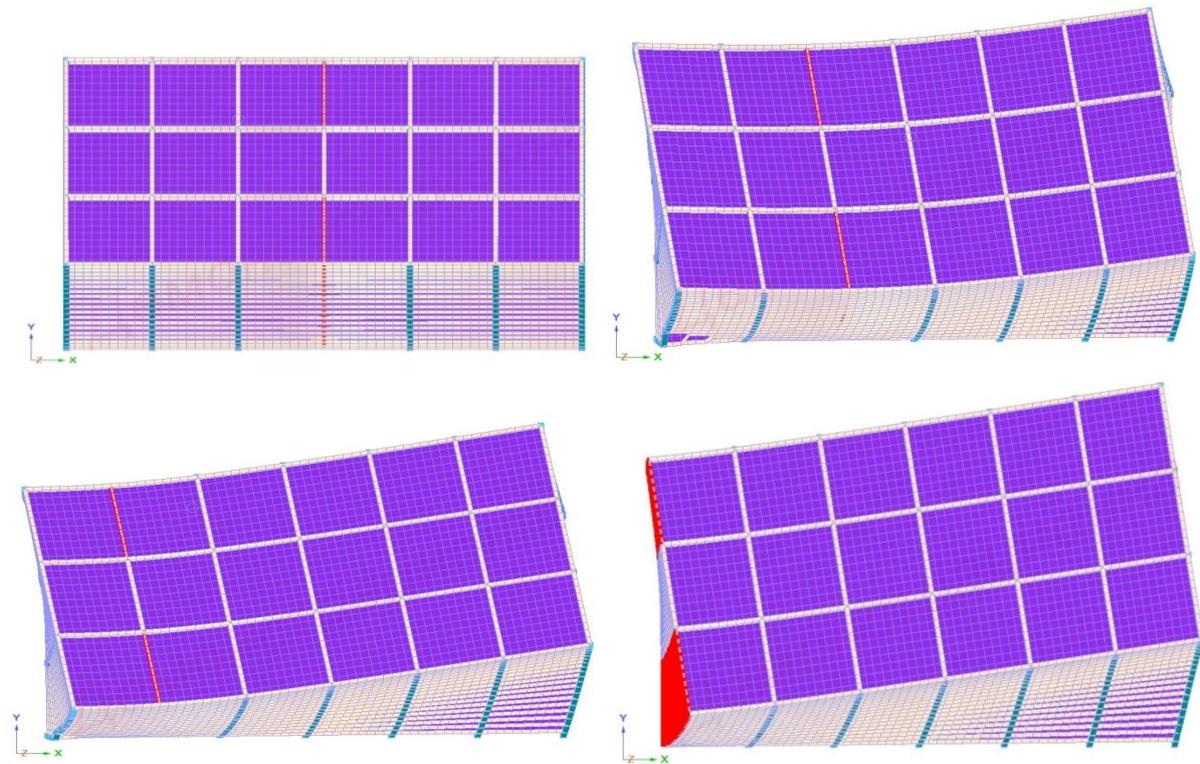


Рис. 9. Деформирование несущей системы по схемам 1-4 соответственно
Figure 9. Deformation of the carrier system according to schemes 1-4, respectively

Нормы сейсмостойкого строительства предлагают для простых конструктивных схем консольную расчетную динамическую модель (РДМ) или пространственную РДМ для сложных несущих систем. Это увязано с целым рядом условий, расчетных ситуаций. Но для консольной РДМ для учета крутящего момента помимо сейсмической нагрузки, следует учитывать крутящий момент относительно вертикальной оси здания, проходящей через его центр жесткости. Значение расчетного эксцентриситета между центрами жесткостей и масс зданий в рассматриваемом уровне рекомендуется принимать не менее $0,1B$, где B - размер здания или сооружения в плане. Следовательно, для нашей схемы при условии выполнения всех требований возможности применения консольной модели эксцентриситет приложения крутящей нагрузки составит 3.6 м. Это

очень большой эксцентриситет и значительное изменение напряженно-деформированного состояния несущих конструкций.

Относительно проще обратиться к сертифицированным программным комплексам, которые реализуют пространственную РДМ с учетом необходимых форм колебаний, в том числе крутильных. Но вопрос о вкладе этого кручения на вертикальные железобетонные конструкции остается открытым. Оставляем открытым перечень факторов, влияющих на формирование напряженно-деформированного состояния сжато-изгибаемых элементов, подверженных кручению.

Рассмотрим реальную конструкцию. Реальные многоэтажные здания содержат большое количество различных элементов жесткости. И не всегда можно оценить наличие реального смещения центра жесткостей относительно центра масс и вклад кручения на итоговые результаты определения напряженно-деформированного состояния конструкций и перемещений, углов поворота всей несущей системы. На рисунке 9 показаны несущие элементы построенного монолитного 31-этажного здания в г. Москве по ул. Дыбенко в пределах ТПУ «Ховрино». Габариты здания в осях в плане составляют 54,30 x 23,10 м. Максимальная высотная отметка по парапету кровли - 95,30 м. Бетон принят класса В30, В40, арматура класса А500С. В качестве элементов жесткости использовались несущие конструкции лестнично-лифтовых узлов, пилоны и диафрагмы жесткости. Толщина этих конструкций варьируется по осям здания и по высоте. Ядра жесткости в зависимости от расположения в плане имеют толщину от 25 до 40 см. Пилоны и колонны приняты толщиной 30 см.

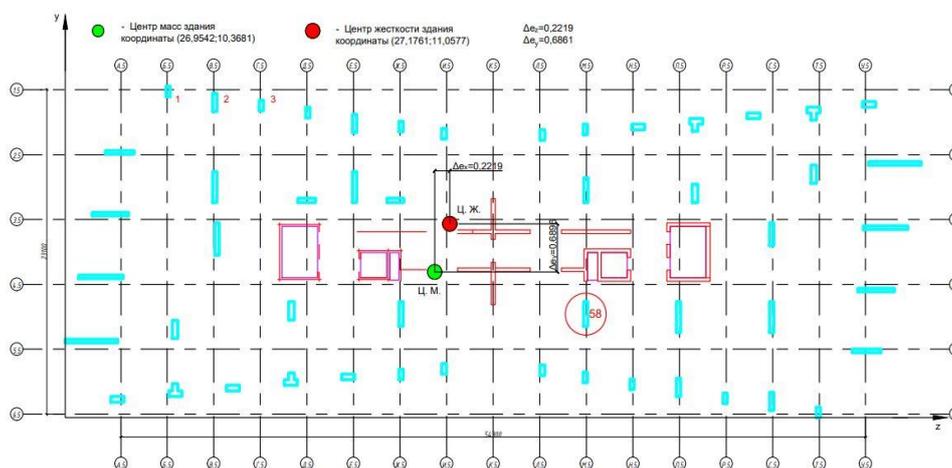


Рис. 10. Расчетная схема монолитного 31-этажного здания
Figure 10. Calculation scheme of a monolithic 31-storey building

Было определено положение центра масс и центра жесткостей. Отклонение по оси Y составило 0,69 м, по оси Z – 0,22 м. С целью оценки влияния кручения выбран пилон № 58, как наиболее нагруженный вертикальный элемент. Добавочный изгибающий момент в заделке здания от кручения в первом приближении был определен в соответствии с [1]. Для данного пилона он составил 14,8% от изгибающего момента без учета кручения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение ряда несущих систем позволяет сделать определенные выводы.

1. Несущие системы многоэтажных зданий обычно обладают несимметричным расположением вертикальных железобетонных конструкций. Центр масс и центр жесткостей в силу архитектурных и конструктивных особенностей не совпадают друг с другом.

2. При действии горизонтальной нагрузки возникает кручение, которое оказывает влияние на работу элементов жесткости. Часть железобетонных конструкций догружается моментом от кручения, часть разгружается. Добавка может быть существенной для элементов жесткости наиболее удаленных от центра здания.

3. Связи сдвига, формирующие пространственную несущую систему, и конструкции, которые они соединяют, испытывают дополнительные крутящие усилия в плоскости своего поперечного сечения и по вертикальной оси здания. Кручение несимметричных систем вызывает сложное поведение несущих конструкций. Относительное ограничение кручения в условиях проектных и запроектных воздействий необходимо для оценки возможного или недопустимого риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов П. Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. М.: Стройиздат, 1977.
2. Naresh Kumar B.G.; Punith N.; Bhyrav R.B.; Arpitha T.P. Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings // *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 2017. Vol. 6. P. 801-804.
3. Botis M., Cerbu C. A. Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures // *Applied Sciences*. 2020. №10, 5555 <https://doi.org/10.3390/app10165555>.
4. Hussein G., Eid N., Khaled H. Torsional behavior of irregular structures during Earthquakes // *Journal of Mechanical and Engineering*. 2019. Vol. 16, I. 5, Ser. IV, P. 40-55. <https://doi.org/10.9790/1684-1605044055>.
5. Khatiwada P., Lumantarna E. Simplified Method of Determining Torsional Stability of the Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings // *Civil Engineering*. 2021, № 2, P. 290-308.
6. Dimova S.L., Alashki I. Seismic design of symmetric structures for accidental torsion // *Bull. Earthquake Eng.* 2003, № 1, P. 303–320.
7. Manish Z., Syed Z.I. Seismic analysis of torsional irregularity in multi-storey symmetric and asymmetric buildings // *Eurasian J. Anal. Chem.* 2017. № 13, P. 286–292.
8. Cando M.A., Hube M.A., Parra P.F., Arteta C.A. Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall build // *Engineering Structures*. 2020. V.219, 110724. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2020.110724>.
9. Varma V., Kumar U. Seismic response on multi-storied building having shear walls with and without openings // *Materials Today: Proceedings*, Vol. 37, Part 2, 2021, P. 801-805, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.827>.
10. Ankur J., Mitesh S. Floor displacement-based torsional amplification factors for seismic design of acceleration-sensitive non-structural components in torsionally irregular RC buildings // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 254, 12022, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113871>.
11. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. О концептуальных положениях норм сейсмостойкого строительства // *Вестник МГСУ*. 2020, Т. 15, Вып. 12. С. 1673-1884.
12. Lyublinskiy V., Struchkov V. Resistance of Vertical Joints During Torsion of Multistorey Buildings. In: Akimov, P., Vatin, N., Tusnin, A., Doroshenko, A. (eds) *Proceedings of FORM*. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 282. Springer, Cham. (2022). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-238>.
13. Люблинский В.А., Стручков В.С., Задорина Л.В. К определению податливости плотных связей панельных многоэтажных зданий при кручении несущей системы // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования*. Москва: Из-во МИСИ-МГСУ, 2022. С. 107-112.
14. Колчунов В.И., Демьянов А. И., Протченко М.В. Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением. // *Строительство и реконструкция*. 2021;(3):27-46. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46>.
15. Карпенко Н., Колчунов Вл., Колчунов В., Травуш В. Расчетная модель сложнапряженного железобетонного элемента при кручении с изгибом // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. 17(1), P. 34–47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-34-47>.
16. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов —необходимое условие безопасности зданий и сооружений // *Вестник ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений»*. 2009. № 1. С. 160–171.
17. 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.

REFERENCES

1. Drozdov P.F. Design and Calculation of Load-bearing Systems of Multi-storey Buildings and their Elements. Moscow, Stroyizdat, 1977, 223 p. (In Russ.).
2. Naresh Kumar B.G., Punith N., Bhyrav R.B., Arpitha T.P. Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 2017. Vol. 6. P. 801-804.
3. Botis M., Cerbu C.A. Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures. *Applied Sciences*. 2020. No 10, 5555 <https://doi.org/10.3390/app10165555>.
4. Hussein G., Eid N., Khaled H. Torsional behavior of irregular structures during Earthquakes. *Journal of Mechanical and Engineering*. 2019. Vol. 16, I. 5, Ser. IV, P. 40-55. <https://doi.org/10.9790/1684-1605044055>.

5. Khatiwada P., Lumantarna E. Simplified Method of Determining Torsional Stability of the Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings. *Civil Engineering*. 2021, no 2, P. 290-308.
6. Dimova S.L., Alashki I. Seismic design of symmetric structures for accidental torsion. *Bull. Earthquake Eng.* 2003, no 1, P. 303–320.
7. Manish 2, Syed Z.I. Seismic analysis of torsional irregularity in multi-storey symmetric and asymmetric buildings. *Eurasian J. Anal. Chem.* 2017. no 13, P. 286–292.
8. Cando M.A, Hube M.A., Parra P.F, Arteta C.A. Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall build. *Engineering Structures*. 2020. V.219, 110724. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724>.
9. Varma V., Kumar U. Seismic response on multi-storied building having shear walls with and without openings. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, Part 2. P. 801-805, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.827>.
10. Ankur J., Mitesh S. Floor displacement-based torsional amplification factors for seismic design of acceleration-sensitive non-structural components in torsionally irregular RC buildings. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 254, 12022, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113871>.
11. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On conceptual provisions of design standards for earthquake resistant construction. *Vestnik MGSU*. 2020. 15 (12): 1673–1684. (In Russ.).
12. Lyublinskiy V., Struchkov V. Resistance of Vertical Joints During Torsion of Multistorey Buildings. In: Akimov, P., Vatin, N., Tusnin, A., Doroshenko, A. (eds) Proceedings of FORM. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 282. Springer, Cham. (2022). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-238>.
13. Lyublinskiy V.A., Struchkov V.S, Zadorina L.V. To the determination of the compliance of tight connections of panel multi-storey buildings during torsion of the carrier system. Actual problems of the construction industry and education. Moscow: Publishing of MISI-MGSU, 2022. P.107-112.
14. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in **reinforced concrete** structures under bending with torsion. *Building and Reconstruction*. 2021. No 3. 27-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46>
15. **Karpenko I, Kolchunov VI., Kolchunov V., Travush I V. Calculation model of a complex stressed reinforced concrete element under torsion with bending.** *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. №17(1), P. 34–47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-34-47>.
16. Tamrazyan A.G. An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Bulletin TSNIISK them. V.A. Kucherenko "Studies in the theory of structures"*. 2009. 1:160-171. (In Russ).
17. 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. P. 4–11. (In Russ).