

УДК 624.044

Ю. С. Вильгельм, В. Н. Власов, К. А. Сухин, К. Н. Сухина, Э. М. Шкабой

Волгоградский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДИАФРАГМ ЖЕСТКОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ

Проведен анализ влияния расположения диафрагм жесткости на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций монолитного многоэтажного дома. Было рассмотрено три варианта конструктивных схем 13-этажного здания сложной конфигурации: 1) вариант, включающий в себя колонны, несущую оболочку (внешние несущие стены), систему диафрагм жесткости и монолитные стены лестнично-лифтовых блоков (ядра жесткости); 2) вариант, при котором конструктивная схема состоит из оболочки (наружные стены) и колонн, монолитные стены лестнично-лифтовых блоков заменены элементами каркаса (колоннами, балками), диафрагмы жесткости отсутствуют; 3) вариант, который представляет собой первый вариант без диафрагм жесткости.

Выполнено численное моделирование работы каркаса здания в ПК «ЛИРА-САПР», получены усилия, возникающие в несущих элементах: наиболее нагруженной колонне, перекрытиях, плите покрытия, фундаментной плите; определены перемещения конструкции здания. Выявлено влияние схемы расположения элементов, обеспечения пространственной жесткости на технико-экономические показатели строительства зданий (масса бетона, арматуры).

К л ю ч е в ы е с л о в а: пространственная жесткость, конструктивная схема, напряженно-деформированное состояние, диафрагма жесткости, несущие конструкции.

Актуальность. Обеспечение пространственной жесткости для многоэтажных зданий сложной конфигурации в плане является важной задачей при проектировании. На примере монолитных железобетонных зданий можно сказать, что широкий спектр горизонтальных нагрузок будет восприниматься диафрагмами и ядрами жесткости. Расположение диафрагм жесткости в объеме здания напрямую влияет на распределение усилий в несущих элементах каркаса: колоннах/пилонах, плитах перекрытий и покрытий. Выбор наиболее рационального варианта расположения диафрагм позволит уменьшить уровень усилий в несущих элементах, тем самым позволит сократить расходы на этапах жизненного цикла здания, таких как строительство, эксплуатация, реконструкция или модернизация.

Цель работы — оценить влияние расположения диафрагм и ядер жесткости, их взаимное влияние на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций каркаса проектируемого монолитного железобетонного здания.

Задачи:

- 1) анализ вопроса обеспечения пространственной жесткости многоэтажных монолитных железобетонных зданий;
- 2) создание пространственных расчетных схем многоэтажного монолитного здания, различающихся конфигурацией расположения в плане диафрагм и лестнично-лифтовых узлов;
- 3) сравнительный анализ НДС несущих элементов здания (колонн, фундаментной плиты, плит перекрытия и покрытия) различных вариантов конструктивной схемы многоэтажного здания;

4) предложение рекомендаций по оптимальному расположению диафрагм жесткости в объеме здания.

Объект исследования — общественное 13-этажное монолитное здание сложной конфигурации в плане.

Предмет исследования — изменение НДС несущих конструкций монолитного многоэтажного здания сложной конфигурации в плане, в зависимости от наличия и расположения диафрагм и ядер жесткости в плане.

Основная задача при проектировании — это выбор наиболее оптимальных конструктивных решений, позволяющих обеспечить требование групп предельных состояний (ПС1, ПС2) и в то же время имеющих меньшую материалоемкость.

За счет снижения уровня напряжений и деформаций в несущих конструкциях здания можно добиться экономической эффективности строительства. Один из способов оптимизации уровня НДС конструкций — это применение оптимального расположения конструкций, обеспечивающих пространственную жесткость, т. е. диафрагм и ядер жесткости в плане.

Вопросу оценки влияния, оказываемого на пространственную работу сооружений и зданий диафрагм жесткости, принципам их расстановки в объеме здания, уточнения методики определения жесткости каркасов зданий посвящены работы как отечественных [1—7], так и зарубежных [8—11] авторов.

Работа Г. Д. Адыракаевой [1] посвящена исследованию пространственной работы железобетонных конструкций зданий при сейсмических воздействиях, а также созданию методики определения прочности и жесткости сборных диафрагм жесткости.

Группа исследователей [2] в своей работе рассматривает различные методики расчета диафрагм жесткости с нерегулярным расположением проемов и предлагает новую конструкцию диафрагм.

В статье А. С. Волгина, И. А. Иванова и Е. П. Гулы [3] выполнена оценка влияния, оказываемого на пространственную жесткость диафрагм жесткости, на примере реконструируемого 17-этажного жилого здания. Результатами исследований [4—6] стали рекомендации по оптимальному расположению ядер и диафрагм жесткости, как в плане, так и по высоте зданий, а также рекомендации по назначению толщины диафрагм.

Зарубежными авторами рассматривался вопрос определения жесткости диафрагм многоэтажных зданий с учетом усадки и ползучести [8—10] а также с учетом характера разрушения в процессе эксплуатации здания [11].

Анализируя нормативную документацию и работы авторов [12—21], можно отметить следующее. По типу применяемых вертикальных несущих конструкций выделяют следующие конструктивные системы (рис. 1):

I — каркасные;

II — с применением поперечных или продольных несущих стен;

III — объемно-блочные;

IV — с расположением внутри здания пространственной опоры — ствола, на который опираются все остальные конструкции;

V — с несущими конструкциями, располагаемыми в плоскости наружных стен (по периметру);

VI — комбинированные, сочетающие в себе применение ранее указанных конструктивных систем.

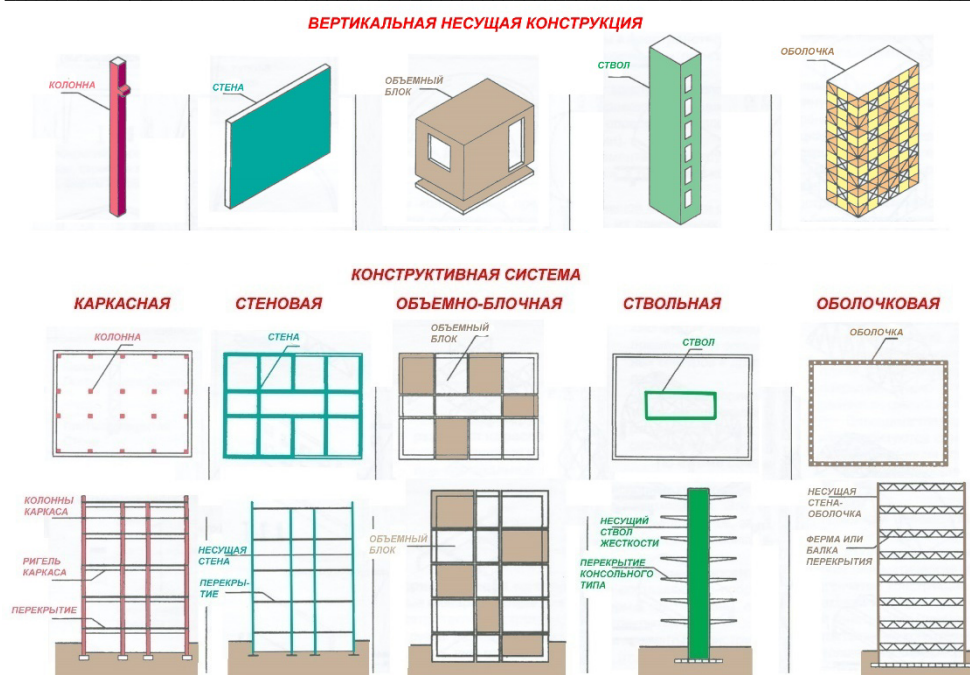


Рис. 1. Классификация конструктивных систем многоэтажных зданий

Наиболее эффективно себя показывают комбинированные конструктивные схемы, сочетающие в себе оболочковые и ствольные системы; данный тип конструктивной схемы наиболее предпочтителен при высотном строительстве. Внешняя оболочка позволяет исключить крутильную форму колебаний, а также повысить жесткость здания, увеличив момент инерции здания.

Касаемо выбора конфигурации расположения диафрагм жесткости в плане, необходимо опираться на форму здания, стремиться повысить жесткость здания, учитывая ограничения I, II, III форм колебаний, исключая кручение. Толщина диафрагм должна составлять минимум 200 мм в монолитном варианте и 140 мм в сборном. Проектирование связевых систем в виде отдельных небольших участков, разбросанных в плане, целесообразно только при небольшой этажности. Оптимальным вариантом расположения диафрагм жесткости является пространственная компоновка в виде связевого ядра.

Анализ. В ходе исследования был выполнен анализ влияния конфигурации расположения ядер и диафрагм жесткости на НДС несущих конструкций многоэтажного здания.

Объект исследования представляет собой 13-этажное общественное здание сложной конфигурации в плане. Конструктивная схема здания комбинированная, включает в себя колонны, перекрытия и внешнюю несущую оболочку. Пространственная жесткость здания обеспечивается диафрагмами и ядрами жесткости (лестнично-лифтовыми блоками и внешней оболочкой). План перекрытия типового этажа представлен на рис. 2, фрагмент разреза — на рис. 3.

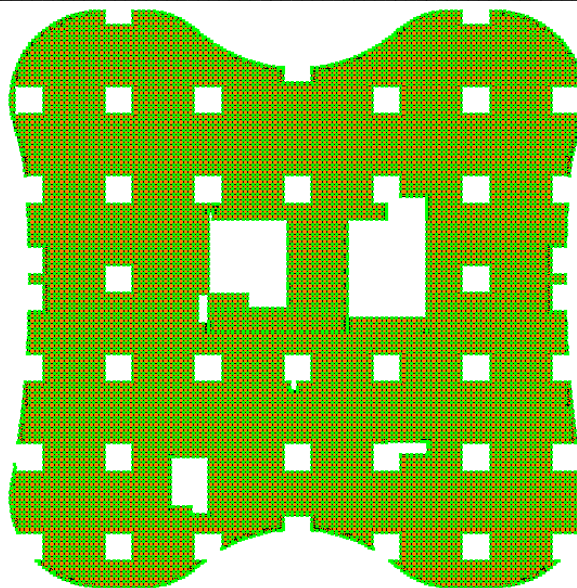


Рис. 2. План перекрытия типового этажа



Рис. 3. Фрагмент разреза

Геометрические характеристики и материал конструкций:

- фундаментная плита толщиной 1000 мм, бетон В30, арматура класса А500 с шагом 200 в обоих направлениях, поперечная арматура А240;
- перекрытия толщиной 200 мм, бетон В30, арматура класса А500 с шагом 200 в обоих направлениях, поперечная арматура А240;
- колонны 600 × 600 мм, бетон В30, арматура класса А500 с шагом 200 в обоих направлениях, поперечная арматура А240;

- внешние несущие стены (оболочка) толщиной 100 мм, бетон В30, арматура класса А500 с шагом 200 в обоих направлениях, поперечная арматура А240;

- диафрагмы жесткости и стены лестнично-лифтовых узлов толщиной 200 мм, бетон В30, арматура класса А500 с шагом 200 в обоих направлениях, поперечная арматура А240.

При расчете были учтены следующие нагрузки:

- собственный вес железобетонных конструкций, конструкций полов, кровельного пирога;

- эксплуатационная нагрузка, расчетное значение которой принимает следующее значение: $q = 4,8$ кПа;

- вес снегового покрова (I район), с учетом образования снеговых мешков, расчетное значение которого при $\mu = 1$ принимает следующее значение: $q = 1,4$ кПа;

- ветровая нагрузка по двум направлениям с учетом пульсации.

Рассмотрены три конфигурации конструктивной схемы:

- 1) вариант, включающий в себя колонны, несущую оболочку (внешние несущие стены), систему диафрагм и лестнично-лифтовые узлы;

- 2) вариант, конструктивная схема которого состоит из оболочки и колонн, отсутствуют диафрагмы, лестнично-лифтовые блоки представлены нагрузкой и никак не включаются в пространственную работу каркаса здания;

- 3) вариант, представляющий собой вариант 1 без диафрагм жесткости.

Анализ НДС конструкций здания выполнен с использованием численного моделирования в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016».

Расчетная схема для многоэтажного здания представлена на рис. 4, жесткостные характеристики элементов — на рис. 5.

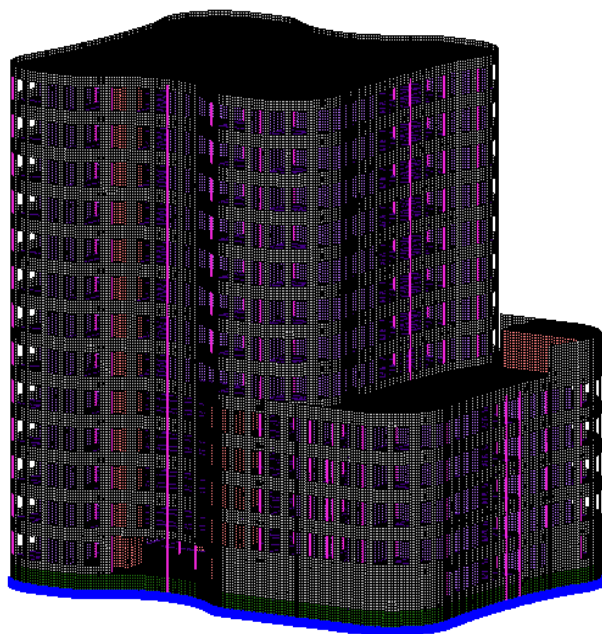


Рис. 4. Пространственная расчетная схема 13-этажного здания

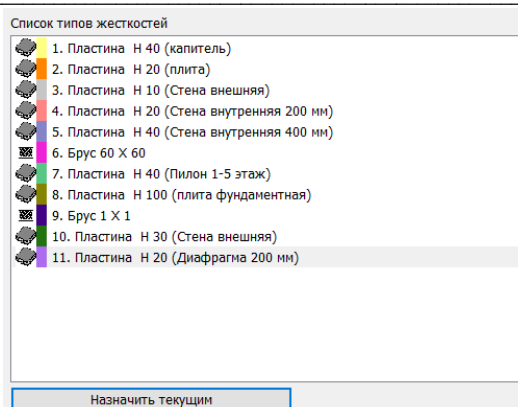


Рис. 5. Жесткостные характеристики КЭ в ПК «ЛИРА-САПР»

В результате расчета 13-этажного монолитного общественного здания сложной конфигурации в плане, согласно принятым конструктивным схемам (варианты 1—3), были получены усилия, возникающие в несущих конструкциях. По результатам полученных усилий рассчитано требуемое армирование элементов.

В табл. 1 и 2 представлено сравнение расхода арматуры для следующих конструктивных элементов: фундаментная плита, плита перекрытия 1-го, 6-го и 10-го этажа, плита покрытия и наиболее нагруженная колонна.

Таблица 1

Сравнительные показатели расхода арматуры для плит

Вариант конструктивной схемы	Расход арматуры, кг	Соотношение относительно варианта 1, %
<i>Фундаментная плита</i>		
1	69 077,39	100
2	83 094,48	120
3	85 272,98	123
<i>Плита перекрытия 1-го этажа</i>		
1	13 983,95	100
2	17 833,60	128
3	18 695,96	134
<i>Плита перекрытия 6-го этажа</i>		
1	13 621,29	100
2	18 698,05	137
3	19 542,30	143
<i>Плита перекрытия 10-го этажа</i>		
1	10 767,67	100
2	13 641,20	127
3	14 396,87	134
<i>Плита покрытия</i>		
1	8191,50	100
2	9932,39	121
3	10 676,51	130

Т а б л и ц а 2

Сравнительные показатели расхода арматуры для наиболее нагруженной колонны

Вариант конструктивной схемы	Расход арматуры, кг	Соотношение относительно варианта 1, %
<i>Сечение колонны от фундаментной плиты до 1-го этажа</i>		
1	69,88	100
2	516,80	740
3	510,07	730
<i>Сечение колонны от 6-го до 7-го этажа</i>		
1	41,44	100
2	344,39	831
3	339,58	819
<i>Сечение колонны от 10-го до 11-го этажа</i>		
1	41,44	100
2	41,44	100
3	41,44	100
<i>Сечение колонны 13-го этажа до плиты покрытия</i>		
1	41,44	100
2	41,44	100
3	41,44	100

Анализируя полученные данные по армированию, можно сделать следующий вывод: устранение диафрагм жесткости в варианте 2 и ядер жесткости в варианте 3 повлекло за собой увеличение усилий в плите на 25...40 %, вследствие чего потребовалось увеличение армирования плит.

Заключение

1. На примере конструкций 13-этажного монолитного общественного здания сложной конфигурации в плане рассмотрено влияние различных конфигураций расположения ядер и диафрагм жесткости на НДС конструкции здания.

2. Рассмотрены три комбинированные конструктивные схемы с различным расположением ядер и диафрагм жесткости в плане, определено НДС строительных конструкций каркаса.

3. На основании анализа результатов армирования можно сделать вывод о значительном перерасходе стали в случае применения недостаточно обоснованных конструктивных схем здания. Для армирования плиты перекрытия потребуется на 20...23 % больше арматуры, для плиты перекрытия типового этажа — в среднем на 28...43 %.

4. Необходимо отметить, что наличие и взаимное расположение диафрагм жесткости существенно влияют на распределение усилий вертикальных конструкций (колонн) от воздействия горизонтальных нагрузок. Об этом свидетельствует значительное повышение изгибающих моментов в колоннах, определенных по вариантам 2 и 3 принятых конструктивных схем. Восприятие этих усилий потребовало увеличения площади армирования колонн в 7...8 раз.

5. Отсутствие диафрагм отрицательно сказывается на общей жесткости каркаса здания, при этом необходимо отметить, что внешняя оболочка включает крутильную форму потери устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Адыракаева Г. Д.* Расчет комбинированных диафрагм жесткости методом сосредоточенных деформаций // Вестн. КРСУ. 2015. № 1. С. 86—89. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/292826>.
2. *Байнатов Ж. Б., Акебекова Ш. Т., Айтмуханова П. М.* Модельный эксперимент и методы расчета каркасно-связевой диафрагмы многоэтажных зданий // Вестн. АО «КазНИИСА». 2020. № 3. С. 26—49. EDN: TABWYG.
3. *Волгин А. С., Иванов И. А., Гула Е. П.* Влияние прочности и жесткости диафрагм на напряженно-деформированное состояние железобетонной пространственной конструкций каркасного многоэтажного здания // Инновации и инвестиции. 2021. № 8. С. 145—147. EDN: BPKUVF.
4. *Горбунов И. А., Медведев Н. Е.* Анализ влияния расположения диафрагм жесткости на напряженно-деформированное состояние рамно-связевого каркаса многоэтажного здания // Материалы 59-й студ. науч.-техн. конф. инженер.-строит. ин-та ТОГУ, 10—23 апр. 2019 / Отв. ред. В. А. Кравчук. Хабаровск : ТОГУ, 2019. С. 314—316. EDN: BCHQPX.
5. *Григорьев С. М., Сапожников А. И.* Особенности взаимодействия диафрагм жесткости с элементами каркаса в зданиях с рамно-связевой конструктивной схемой // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2010. № 11(142). С. 29—31. EDN: FGKKBI.
6. *Гулак Л. И., Рябых А. В.* Исследование пространственной жесткости зданий со связевым каркасом // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Высокие технологии. Экология. 2014. № 1. С. 44—46. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/296620>.
7. *Иванов С. Ю., Завьялов И. С., Багдасарян В. Э.* Учет влияния диафрагм жесткости на работу сооружения // XXVI Регион. конф. молодых ученых и исследователей Волгогр. обл. : сб. материалов конф., г. Волгоград, 16—28 нояб. 2021. Волгоград : ВолГТУ, 2022. С. 247—248. EDN: HQOBGI.
8. *Abou-Zeid M.* Control of cracking in concrete structures : report. ACI Committee. 1980.
9. *Cenan Mertol H. C., Rizkalla S., Zia P., Mirmiran A.* Creep and shrinkage behavior of high-strength concrete and minimum reinforcement ratio for bridge columns // PCI Journal. 2010. Vol. 55. No. 33. Pp. 138—154.
10. *Bagitova S. Zh., Baynatov Zh. B., Tanzharikov B. K., Sissembina K. S.* Calculation of the multistory frame buildings diaphragm stiffness // Science and Technology of Kazakhstan. 2014. Vol. 1. No. 2. Pp. 17—22.
11. *Yakovenko I., Kolchunov V., Lyman I.* Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116. P. 02016.
12. *Краснощечков Ю. В.* Сборные железобетонные перекрытия и покрытия. Проектирование конструкций : моногр. Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 344 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/148417>.
13. *Курдюмова С. И., Дзюба В. А.* Исследование эффективных форм элементов жесткости высотных зданий // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 29—30 нояб. 2017 : в 2 ч. Ч. 2. Комсомольск-на-Амуре : КнАГУ, 2018. С. 152—155. EDN: YSMXDP.
14. *Лишак В.И.* Расчет бескаркасных зданий с применением ЭВМ. М. : Строиздат, 1977. 176 с.
15. *Багитова С. Ж., Байнатов Ж. Б., Танжарииков Б. К., Сисембина К. С.* Методика расчета многоэтажных каркасных зданий с диафрагмами жесткости // Тр. ун-та. 2014. № 1(54). С. 75—78. EDN: TJGWSF.
16. *Науменко А. А., Дзюба В. А.* Конструктивные схемы высотных зданий // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 16—17 дек. 2021 / Отв. ред. О. Е. Сысоев. Комсомольск-на-Амуре : КнАГУ, 2022. С. 201—203. EDN: XQXCGR.
17. *Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Галда З. Ю.* Объемные блок-модули как разновидность модульных конструкций быстровозводимых строительных систем // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 5—13. EDN: PRPPWA.

18. Agrawal A. A., Sanghai S. S., Dabhekar K. Review on analysis and design of precast structures // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. 2021. Vol. 8. No. 2. Pp. 345—350. DOI: 10.32628/IJSRSET218267.
19. Henin E., Tardros M. Shallow flat soffit precast concrete floor system // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2013. Vol. 18. No. 2. Pp. 101—110. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000135.
20. Structural systems of high-rise buildings / V. Pershakov, A. Bieliatynskiy, S. Bilyk et al. // Proceedings of National Aviation University. 2020. Vol. 2. No. 83. Pp. 54—62. DOI: 10.18372/2306-1472.83.14644. EDN: SMPJAT.
21. Assessment of existing precast concrete gravity load floor framing systems / S. Pessiki, R. Prior, R. Sause et al. // PCI Journal. 1995. Vol. 40. No. 2. Pp. 70—83. DOI: 10.15554/pci.03011995.70.83.

© Вильгельм Ю. С., Власов В. Н., Сухин К. А., Сухина К. Н., Шкабой Э. М., 2025

Поступила в редакцию
28.07.2025

Ссылка для цитирования:

Влияние расположения диафрагм жесткости на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций многоэтажного здания / Ю. С. Вильгельм, В. Н. Власов, К. А. Сухин, К. Н. Сухина, Э. М. Шкабой // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 4(101). С. 21—30. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_21.

Об авторах:

Вильгельм Юрий Степанович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Власов Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Сухин Кирилл Александрович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; suhin.kirill@mail.ru

Сухина Ксения Николаевна — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Шкабой Элина Марселевна — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; shaykhutdinova_elina@mail.ru

**Yurij S. Wilgelm, Vladimir N. Vlasov, Kirill A. Sukhin, Kseniya N. Sukhina,
Elina M. Shkaboy**

Volgograd State Technical University

INFLUENCE OF STIFFENING DIAPHRAGM LOCATION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF A MULTI-STORY BUILDING

The influence of shear diaphragm placement on the stress-strain state (SSS) of the load-bearing structures of a monolithic multi-story building was analyzed. Three variants of structural schemes for a 13-story building with a complex configuration were considered: 1) a variant including columns, a load-bearing shell (external load-bearing walls), a system of shear diaphragms, and monolithic walls of stair and elevator blocks (shear cores); 2) a variant in which the structural scheme consists of a shell (external walls) and columns, the monolithic walls of the stair and elevator blocks are replaced

by frame elements (columns, beams), and shear diaphragms are absent; 3) a variant, which is the first variant without shear diaphragms.

Numerical modeling of the building frame performance was performed in the LIRA-SAPR software package, and the forces arising in the load-bearing elements were obtained: the most loaded column, floors, roof slab, and foundation slab; the displacements of the building structure were determined. The influence of the layout of elements and provision of spatial rigidity on the technical and economic indicators of building construction (concrete mass, reinforcement) was revealed.

Key words: spatial rigidity, structural scheme, stress-strain state, rigid diaphragm, supporting structures.

For citation:

Wilgelm Yu. S., Vlasov V. N., Sukhin K. A., Sukhina K. N., Shkaboy E. M. [Influence of stiffening diaphragm location on the stress-strain state of load-bearing structures of a multi-story building]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 4, pp. 21—30. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_21.

About authors:

Yurij S. Wilgelm — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Vladimir N. Vlasov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Kirill A. Sukhin — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; suhin.kirill@mail.ru

Kseniya N. Sukhina — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Elina M. Shkaboy — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; shaykhutdinova_elina@mail.ru