

Анализ конструктивных схем многоэтажного деревянного здания

С.А. Исупов, Е.А. Носов, И.С. Шульгин

Вятский Государственный Университет

Аннотация: В статье рассматривается вопрос применения несущих и ограждающих конструкций из клееной древесины для многоэтажных, в том числе жилых, зданий. Актуальность строительства деревянных многоэтажных зданий подтверждается достаточно большим опытом строительства за рубежом. В России в настоящее время также проявляется все больший интерес к данной отрасли. В предлагаемой работе на основании теоретического исследования выполнен анализ напряженно-деформированного состояния и технико-экономических показателей трех конструктивных схем здания: каркасная схема – полный каркас с несущими колоннами, балками перекрытия и покрытия; комбинированная конструктивная схема – вертикальными несущими элементами являются деревянные колонны, в качестве перекрытия и покрытия применяется клееная деревянная плита; бескаркасная конструктивная схема – все конструктивные элементы выполнены из клееных деревянных панелей. В результате выявлено наиболее рациональное и экономически выгодное конструктивное решение многоэтажного здания из деревянных клееных элементов.

Ключевые слова: Клееные деревянные конструкции, деревянное многоэтажное здание, конструктивный расчет, экономическая эффективность, напряженно-деформированное состояние.

Введение

В настоящее время, как в Российской Федерации, так и за рубежом, наблюдается рост интереса к вопросам экологичности строительных материалов, повышению теплозащитных и прочностных характеристик, а также к повышению скорости и оптимизации стоимости строительства [1, 2]. Поставленные задачи являются исходными данными для поиска инновационных строительных материалов и конструктивных решений. Один из вариантов решения этих задач - строительство зданий с применением несущих и ограждающих конструкций из клееной древесины.

По состоянию на 2023 год, Министерство Строительства и жилищно-коммунального хозяйства совместно с МЧС Российской Федерации утвердили план мероприятий по развитию деревянного домостроения на период до 2024 года, в который вошли: разработка нормативной документации, выполнение научно-исследовательских и опытно-

конструкторских работ, целью которых является подтверждение безопасности строительства деревянных многоэтажных зданий высотой до 28 метров (Министерство Строительства Российской Федерации, 2022).

Строительством многоэтажных деревянных зданий заинтересовались еще в конце прошлого века в Европе. Интерес к подобным зданиям возник в связи с изобретением технологии Cross Laminated Timber (далее – CLT) (рис.1), что представляет собой многослойную клееную деревянную панель [3, 4].

Одновременно с этим, научное сообщество столкнулось с проблемой недостаточной подтвержденности в вопросах безопасности данного строительного материала, что положило начало активному изучению применения данных строительных материалов для безопасной эксплуатации [5].

Современные технологии позволили улучшить производство деревянных клееных конструкций, были изобретены материалы, способствующие повышению огнестойкости и снижению воздействия вредных процессов на древесину [6].

За рубежом уже существует достаточное количество многоэтажных зданий, в которых применяются несущие и ограждающие конструкции из клееной древесины. На рис. 1 представлены наиболее характерные образцы существующих зданий.

Достаточная активность в этой отрасли начала проявляться и в Российской Федерации; так, в 2022 году, компания «Segezha Group» представила первое многоэтажное деревянное здание (рис.2). Строительство данного здания положило начало государственным программам по строительству деревянных многоэтажных деревянных зданий в России.

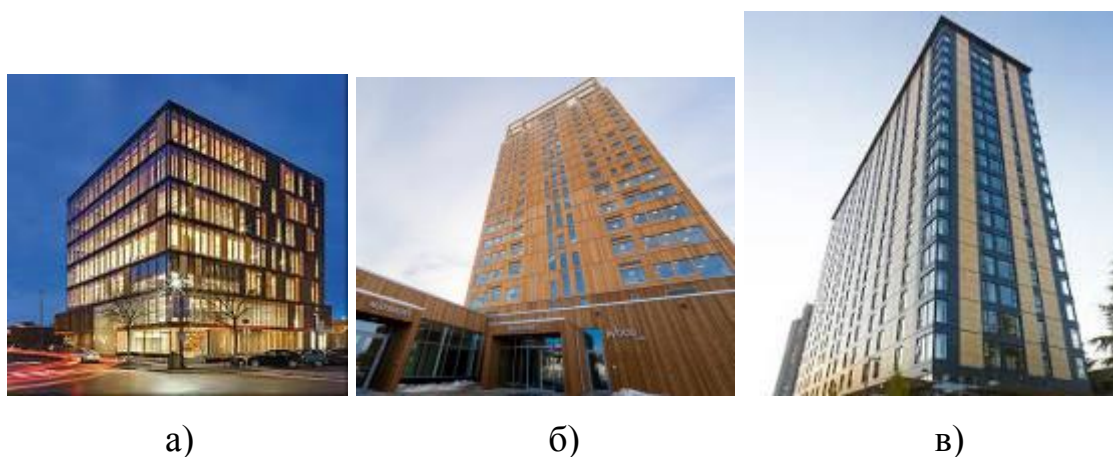


Рис. 1. - а) здание Wood Innovation and Design Centre, расположенное в г. Принс-Джордж, Канада [7], б) башня Mjøstårnet, расположенная в районе г. Осло, Норвегия [8], в) 18-этажное здание из дерева в университетском кампусе Ванкувера высотой 53 метра [9].

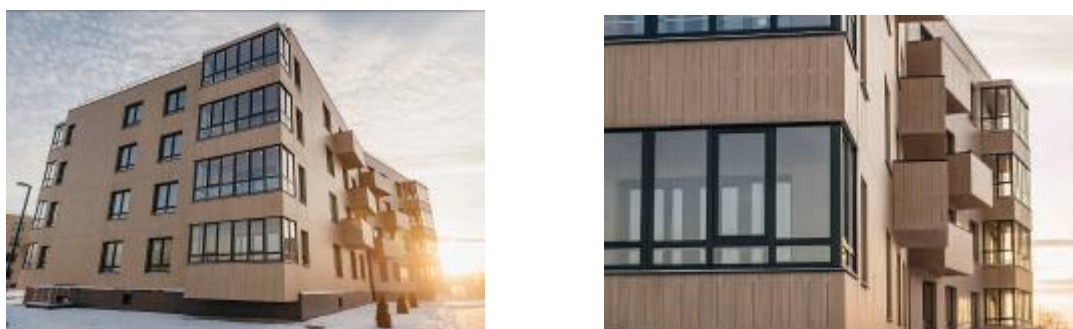


Рис. 2. – жилой комплекс «Соколики», г. Сокол, Вологодская область [10].

Одной из самых распространенных конструктивных схем деревянного многоэтажного домостроения является каркасная конструктивная схема. Каркас представляет собой совокупность несущих колонн, ригелей и связевых элементов. Каркас может быть рамным, рамно-связевым, связевым.

Каркасные деревянные здания подразделяются на без ригельные, стоечно-балочные, рамные и пространственно-деревянные. Каркасные здания обладают высокой прочностью и устойчивостью, а также имеют

относительно невысокий показатель по объему и массе строительных конструкций, что является экономически выгодным решением [11].

Еще одной распространенной конструктивной схемой является блочно-модульная (бескаркасная) конструктивная схема. Конструктивная схема представляет собой совокупность объемно-пространственных элементов, выполняемых в заводских условиях, доставляемых на строительную площадку в виде отдельных блоков, секций или целого здания. Пространственная устойчивость обеспечивается продольными и поперечными несущими деревянными клееными панелями и жестким диском, выполненными по технологии CLT.

Также востребована комбинированная конструктивная схема. Конструктивная схема представляет собой совокупность вертикальных элементов – колонн и горизонтальных – CLT-плиты. Пространственная устойчивость обеспечивается жестким диском перекрытия и устройством вертикальных связей.

Сложность конструирования и проектирования многоэтажных деревянных зданий заключается в том, что расчет таких зданий в некоторой степени отличается от расчета железобетонных и кирпичных зданий, а также зданий из металла. При проектировании необходимо учитывать специфические свойства древесины, в частности ее анизотропию - различие механических свойств в двух ортогональных направлениях вдоль и поперек волокон [12]. Расчеты отдельных деревянных конструкций регламентированы в нормативных документах, а изучение работы многоэтажных деревянных зданий активно развивается [13, 14].

В связи с недостаточной освещенностью вопросов стоимости и материалоемкости, а также недостатком информации о данных о напряженно-деформируемом состоянии такого рода зданий, был проведен

сравнительный анализ различных вариантов многоэтажного деревянного здания.

Численное теоретическое исследование

Для исследования выбрано 8-этажное прямоугольное в плане деревянное здание с сеткой осей 6 x 9 метров с различными конструктивными схемами.

Выбрано 3 варианта конструктивных схем:

- Вариант №1 - каркасная конструктивная схема (рис. 3а) – полный каркас с несущими колоннами, балками перекрытия и покрытия, а также связевыми ригелями. В качестве ядра жесткости приняты железобетонные лифтовые шахты. Рассмотрены два исполнения – с шарнирными и жесткими сопряжениями элементов.
- Вариант №2 (рис. 3б) - комбинированная конструктивная схема – вертикальными несущими элементами являются деревянные колонны, в качестве перекрытия и покрытия применяется сплошная клееная деревянная плита.
- Вариант №3 (рис. 3в)- бескаркасная конструктивная схема: все конструктивные элементы выполнены из клееных деревянных панелей.

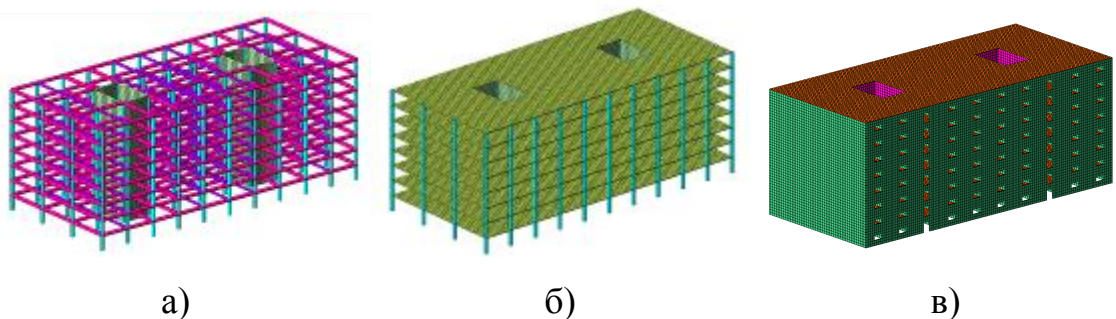


Рис. 3. - Пространственные модели вариантов: а) Вариант №1;
б) Вариант №2; в) Вариант №3

Результатом расчета является напряженно деформируемое состояние объекта. Полученные горизонтальные и вертикальные перемещения (рис. 4а-в) не превышают предельно допустимых значений. Коэффициенты запаса устойчивости для всех вариантов превышают минимальный коэффициент, равный 2.

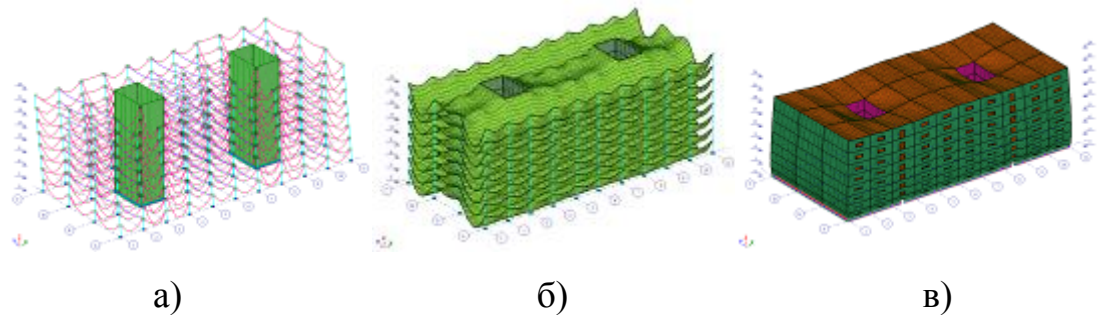


Рис. 4. - деформированные схемы вариантов: а) Вариант №1;
б) Вариант №2; в) Вариант №3

По результатам статического расчета выполнен конструктивный расчет несущих элементов конструктивных схем и определены оптимальные поперечные сечения (табл. 1).

Таблица № 1

Результаты конструктивного расчета

Элемент	Вариант №1. Шарниры	Вариант №1. Жесткие	Вариант №2. Шарниры	Вариант №2. Жесткие	Вариант №3
Колонна	600х600 мм	600х700 мм	400х500 мм	400х500 мм	600х600 мм
Главная продольная балка	400х500 мм	400х500 мм	-	-	-
Главная поперечная балка	400х500 мм	400х400 мм	-	-	-
Второстепенная балка	400х400 мм	400х200 мм	-	-	-
Панель	-	-	250 мм	200 мм	200 мм

перекрытия					
Стеновая панель	-	-	-	-	200 мм

Технико-экономическая оценка результатов

В итоге выполнен анализ технико-экономических показателей (далее ТЭП) конструктивных схем.

Для визуальной оценки, были построены диаграммы сравнения объемов строительных конструкций вариантов конструктивных схем многоэтажного деревянного здания (рис. 5) на основании результатов конструктивного расчета (табл. 1).

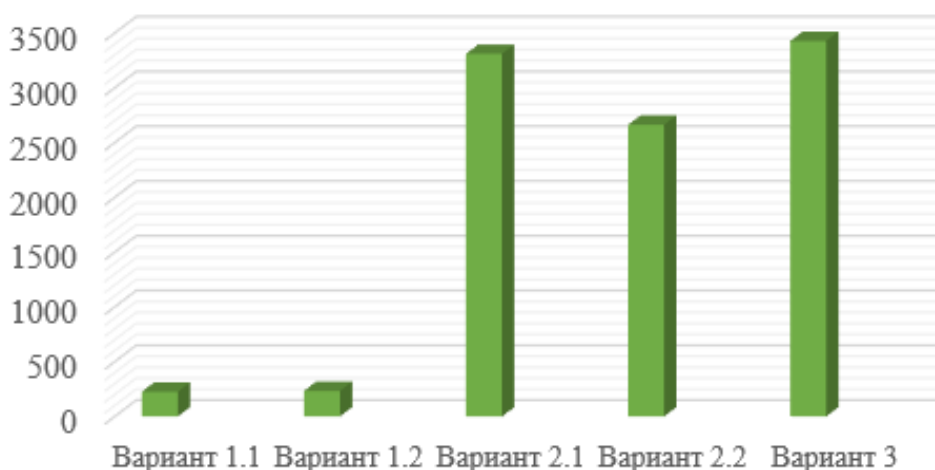


Рис. 5. - Диаграмма материалоемкости вариантов

По результатам сравнения объемов, наиболее материалоемкой конструктивной схемой является вариант №3 – конструктивная схема с деревянными клееными стеновыми панелями и плитами покрытия.

На втором месте по материалоемкости находится вариант №2.1 – комбинированная конструктивная схема с деревянными клееными колоннами и деревянными клееными плитами покрытия с шарнирным соединением элементов. Объем строительных конструкций варианта №2.1 на 4.5 %

меньше, чем у варианта №1, а также на 24 % больше, чем у варианта №2.2. Это объясняется тем, что сечение плиты перекрытия при шарнирном сопряжении воспринимает больший изгибающий момент, в связи с чем обладает большим сечением, чем плита перекрытия, жестко сопряженная с колоннами.

Наименее материалоемким вариантом конструктивной схемы является вариант №1.1 – каркасная конструктивная схема с шарнирным сопряжением элементов. Объем строительных конструкций варианта №1.1 на 93,4 % меньше, чем объем варианта №3, а также на 3 % меньше, чем у варианта №1.2.

Анализ стоимости вариантов конструктивных схем выполнен на базе предприятия «Segezha GROUP». По состоянию на 2023 год, стоимость клееного бруса составляет 55 тыс. рублей за кубический метр. Стоимость стеновых CLT-панелей составляет 65 тыс. рублей за кубический метр, стоимость CLT-панелей перекрытия 60,5 тыс. рублей.

В варианте №1 и варианте №2 при оценке стоимости учитывалась стоимость ограждающих конструкций, т.к. в варианте №3 стеновые панели являются как несущими, так и ограждающими элементами. Результаты приведены в диаграмме на рис. 6.

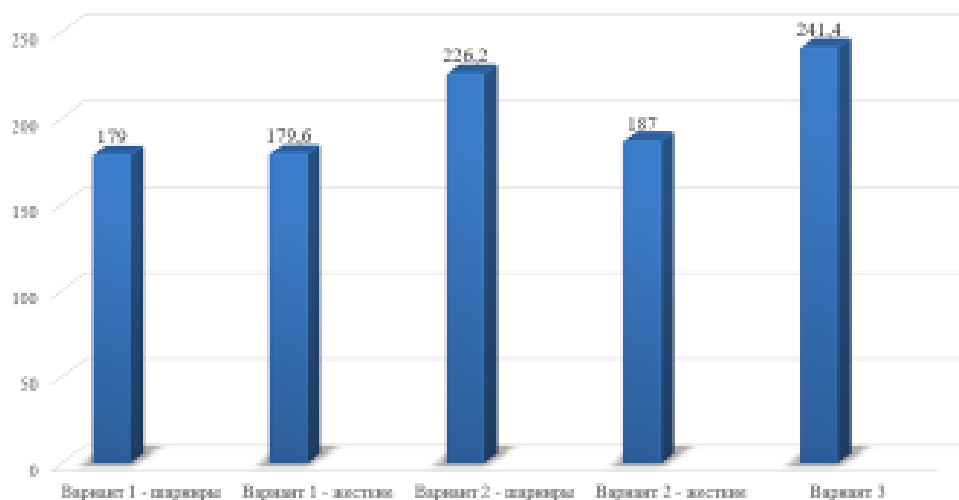


Рис. 6. - Диаграмма стоимости основных конструкций многоэтажного деревянного здания с различными конструктивными схемами.

Выводы

В результате анализа технико-экономических показателей конструктивных схем, получено наиболее оптимальное решение с точки зрения материалоемкости и стоимости: минимальная материалоемкость и стоимость получена для варианта №1 – каркасная конструктивная схема с шарнирным сопряжением элементов.

В заключение можно отметить, что возрастающий интерес к многоэтажным деревянным зданиям оправдан.

Современные технологии и материалы позволяют обеспечить безопасную эксплуатацию таких зданий.

Полученные результаты исследований напряженно-деформируемого состояния рассматриваемых конструктивных схем, согласно актуальным нормативным документам, могут быть использованы при оценке вариантов рационального проектирования многоэтажных деревянных зданий.

При наличии в регионе завода изготовителя несущих деревянных клееных конструкций, можно сделать вывод о целесообразности применения рассмотренных вариантов многоэтажных деревянных зданий взамен традиционных строительных материалов.

Литература

1. Петрова Е.А., Коршунов А.Ф. Перспективы строительства экологически чистых зданий // Современное строительство и архитектура, 2022, №1 (25) URL: doi.org/10.18454/mca.2022.25.2.

2. Mergel C., Menrad K., Decker T. Wood or not? An analysis of regional differences in wooden residential building permits in Germany // Journal of Cleaner Production, 2022, 376 URL: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134328.

3. De Araujo V., Christoforo A. The global cross-laminated timber (CLT) industry: a systematic review and a sectoral survey of its main developers // Sustainability, 2023, vol. 15 URL: doi.org/10.3390/su15107827.

4. Акшов Э.А. Технологические особенности клеёных деревянных конструкций // Architecture and Modern Information Technologies, 2021, №1 (54) URL: marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/10_akshov.pdf.

5. Косов И.И. Деревянные панели CLT в строительстве общественных зданий // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral», 2019, №2 URL: e-integral.ru/wp-content/uploads/2020/06/nomer-2-2019-arhiv.pdf.

6. Гайнцева А.А., Аксенов С.Г., Лукьянова И.Э. Защита деревянных конструкций от огня: пропитка и огнезащитные составы // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2022, №11-2 (74). URL: intjournal.ru/wp-content/uploads/2023/01/Gajntseva.pdf.

7. Wood Innovation and Design Centre. URL: thinkwood.com/construction-projects/wood-innovation-and-design-centre.

8. The Future of Architecture: CLT Wooden Skyscrapers. URL: agacad.com/blog/the-future-of-architecture-clt-wooden-skyscrapers.

9. Timber Towers. URL: revolve.media/views/timber-towers.

10. Segezha Group построила первые в России деревянные жилые CLT-многоэтажки. URL: segezha-group.com/press-center/news/segezha-group-postroila-pervye-v-rossii-derevyannye-zhilye-cltmnogoetazhki/?sphrase_id=30176.

11. Шамаева Т.В., Кувшинов А.В. Перспектива проектирования и строительства деревянных многоэтажных зданий и зданий средней этажности // Инновации и инвестиции, 2020, №4. URL: innovazia.ru/upload/iblock/f82/№4%202020.pdf.

12. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf.

13. Коновалов М.А., Козинец Г.Л. Алгоритм разработки расчетной модели деревянного многоэтажного здания // Вестник МГСУ, 2022, №4. URL: doi.org/10.22227/1997-0935.2022.4.463-475.

14. Потапова Т.В. Усиление CLT-панелей композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2023, №7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_10__8_potapova.pdf_7bbaa8a1bf.pdf.

References

1. Petrova E.A., Korshunov A.F. *Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura*, 2022, №1 (25). URL: doi.org/10.18454/mca.2022.25.2.

2. Mergel C., Menrad K., Decker T. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376 URL: doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134328.

3. De Araujo V., Christoforo A. *Sustainability*, 2023, vol. 15. URL: doi.org/10.3390/su15107827.

4. Akshov E.A. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2021, №1. (54). URL: marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/10_akshov.pdf.

5. Kosov I.I. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy «Integral»*, 2019, №2. URL: e-integral.ru/wp-content/uploads/2020/06/nomer-2-2019-arhiv.pdf.

6. Gayntseva A.A., Aksenov S.G., Luk'yanova I.E. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2022, №11-2 (74). URL: intjournal.ru/wp-content/uploads/2023/01/Gajntseva.pdf.

7. Wood Innovation and Design Centre. URL: thinkwood.com/construction-projects/wood-innovation-and-design-centre.



8. The Future of Architecture: CLT Wooden Skyscrapers. URL: agacad.com/blog/the-future-of-architecture-clt-wooden-skyscrapers.
9. Timber Towers. URL: revolve.media/views/timber-towers.
10. Segezha Group postroila pervye v Rossii derevyannye zhilye CLT-mnogoetazhki. URL: segezha-group.com/press-center/news/segezha-group-postroila-pervye-v-rossii-derevyannye-zhilye-cltmnogoetazhki/?sphrase_id=30176.
11. Shamaeva T.V., Kuvshinov A.V. Innovatsii i investitsii, 2020, №4. URL: innovazia.ru/upload/iblock/f82/№4%202020.pdf.
12. Rogozhina A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf.
13. Konovalov M.A., Kozinets G.L. Vestnik MGSU, 2022, №4. URL: doi.org/10.22227/1997-0935.2022.4.463-475.
14. Potapova T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_10__8_potapova.pdf_7bbaa8a1bf.pdf.