

УДК 624.078.4; 624.011.2

© В. В. Чередниченко, аспирант

© Б. В. Лабудин, д-р техн. наук, профессор

© А. В. Карельский, канд техн. наук, доцент

© Е. В. Попов, канд. техн. наук, доцент

(Северный (Арктический) федеральный университет

имени М. В. Ломоносова,

г. Архангельск, Россия)

E-mail: vazcheredd@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-5-28-40

© V. V. Cherednichenko, post-graduate student

© B. V. Labudin, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. V. Karelsky, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© E. V. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Northern (Arctic) Federal University

named after M. V. Lomonosov,

Arkhangelsk, Russia)

E-mail: vazcheredd@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ СВЯЗЕЙ В УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НА СИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ИЗ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМИКИ

### INFLUENCE OF THE DUCTILITY OF JOINTS IN NODAL CONNECTIONS ON THE FORCE RESISTANCE OF WOOD COMPOSITE FRAME STRUCTURES OF MULTI-STOREY BUILDINGS UNDER SEISMIC CONDITIONS

На примере высотного многоэтажного (25 этажей) здания выполнены численные исследования и сделан анализ влияния податливости узловых соединений на изменение силового сопротивления и деформирования конструкций в условиях сейсмических нагрузок интенсивностью 8 баллов для I и III типов грунтовых условий. Учтена податливость связей трех типов: самонарезающих и наклонно-винченных винтов, когтевых коннекторов со стальными гладкими нагелями. Построены гистограммы для сравнения общих перемещений и внутренних усилий в элементах конструкций при различных грунтовых условиях и различной податливости связей в условиях сейсмической нагрузки. Показано, что в узлах сопряжения податливость связей разных типов существенно различается и влияет на перераспределение внутренних усилий и общие деформации конструкций здания. Сформулированы рекомендации и сделаны выводы, в том числе о необходимости дальнейшего изучения сейсмостойкости зданий с применением перекрестно-клееной древесины при изменении объемно-планировочных решений, учитывая диссипативные свойства материала и упруго-деформируемых связей как в упругой, так и в нелинейной постановке задачи.

*Ключевые слова:* высотное строительство, CLT-панель, сейсмика, диссипация энергии связей.

On the example of a high-rise multi-storey (25 floors) building, there were implemented numerical studies and made an analysis of the influence of nodal joints' ductility on the value of force resistance and deformation of structures under seismic loads with intensity of 8 points for the types I and III of base conditions. The ductility of three types of joints is taken into account, namely, self-tapping and tilted screws, connectors with steel smooth dowels. There have been constructed histograms for comparison of general displacements and internal forces in structural members of structures under different soil conditions and various values of joints' ductility under different seismic conditions. It is shown that in the joint nodes, the ductility of joints of different types differs significantly and affects the redistribution of internal forces and general deformations of the building structure. Recommendations are offered, and conclusions are made, including the need for further study of the buildings' seismic resistance with the use of cross-glued wood when changing the volume-planning solutions, taking into account the dissipative properties of the material and elastic-deformable joints in both elastic and nonlinear formulation of the problem.

*Keywords:* high-rise construction, CLT panel, seismic, joints' energy dissipation.

## Введение

В Российской Федерации наряду с огромными территориями, имеющими сложные инженерно-геологические условия строительства, около 20 % территорий расположены в сейсмически опасных зонах. В Японии, Чили, Мексике, Филиппинах сейсмоопасны 100 % территорий.

При проектировании зданий и сооружений на этих территориях необходимо учитывать не только статические, но и динамические нагрузки. Особую сложность при расчете вызывают сейсмические воздействия. Вопросами сейсмических исследований занимались в России и бывшем СССР К. С. Завриев, А. Г. Назаров, С. В. Медведев, И. Л. Корчинский, Б. К. Карапетян, Я. М. Айзенберг, В. С. Беляев, Т. А. Белаш, А. Н. Бирбаер, П. А. Дмитриев, И. В. Гольденблат, Г. Н. Карцивадзе, И. В. Корчинский, А. М. Масленников, Э. Е. Хачиян, Н. А. Николаенко, В. С. Поляков, Ю. Л. Рутман, А. М. Уздин, С. Г. Шульман, М. У. Ашимбаев, И. К. Белобров, Ю. И. Пузанков, А. А. Гвоздев, Н. К. Карапетян, А. А. Деркачев и другие [1–4], а также зарубежные ученые М. Био, К. Сюэхиро, Ф. Роджерс, Н. Мононобе, Ф. Омори, Э. Розенблюэт, Н. Ньюмарк и др. [5–7]. Ряд работ посвящен исследованиям поведения зданий и сооружений в условиях сейсмике [8–10].

Исследования работы конструкций при различных сейсмических нагрузках проводятся и в настоящее время. На примере 4-этажного жилого дома из CLT-панелей, построенного в г. Соколе Вологодской области, были выполнены тестовые расчеты и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций в условиях сейсмической нагрузки, принятой в диапазоне 7–9 баллов [11, 12]. Получены первые удовлетворительные результаты численного анализа в условиях различной сейсмической и ветровой нагрузки, что позволило перейти к выбору известного аналога высотного здания из деревокомпозитных конструкций

(ДКК) — «Mjostarnet» (Брумунддал, Норвегия) [13].

В настоящее время в ЦНИИСК им. Кучеренко с нашим участием разрабатывается новый нормативный документ — Свод правил по проектированию многоэтажных зданий из комбинированных конструкций с использованием клееной древесины.

Отметим, что при освоении сейсмоопасных территорий и строительстве зданий и сооружений используются в основном традиционные материалы: кирпич, бетон, металл. Древесина и деревокомпозитные конструкционные материалы до сих пор в условиях сейсмике используются недостаточно из-за отсутствия комплексных исследований. Поэтому приведенные в статье результаты исследований многоэтажного здания из ДКК и перекрестно-клееных панелей (CLT) являются актуальными.

### Цель и задачи исследования<sup>1</sup>

Цель работы: на основе численных расчетов дать оценку влияния податливости узловых соединений на изменение и распределение внутренних усилий и общих перемещений в элементах высотного многоэтажного здания из деревокомпозитных конструкций.

Задачи:

1. Выбрать объемно-планировочное и конструктивное решение высотного здания на основе ранее выполненных численных исследований и численную расчетную модель здания.

2. Выполнить расчеты в программном комплексе SCAD++ с тремя различными типами связей (жесткие, упругоподатливые, шарнирные) на действие сейсмических нагрузок согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах».

3. Провести анализ полученных результатов и дать сравнительную оценку влияния податливости связей на изменение внутренних усилий и общих перемещений в элемен-

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет средств Программы развития САФУ на 2021–2035 гг., договор Д-393.2024.

тах высотного многоэтажного здания из древокомпозитных конструкций.

Гипотезы и допущения:

1. Клееная древесина рассматривается как однородный материал ввиду малой толщины клеевых прослоек, соединяющих слои (ламе-ли) древесины между собой.

2. Компоненты напряжений и деформаций считают связанными линейно, то есть материал подчиняется обобщенному закону Гука до определенного предела нагружения.

3. Слои плит перекрытия с направлением волокон древесины под углом  $90^\circ$  к пролету или направлению действия усилия исключены из работы (СТО «Конструкции из древесины перекрестно-клееной»).

#### Объект исследования и его конструкция

Объектом исследования является разработанная на основе [14] пространственно-регулярная система многоэтажного высотного здания из древокомпозитных конструкций. Конструктивные решения: высота здания — 75 м; высота этажа — 3 м; размеры в плане — 36×36 м; сетка колонн — 6×6 м; колонны наружные — 891×891 мм, внутренние — 924×924 мм; конструктивная схема — каркасно-связевая; лестнично-лифтовый узел в центре здания, размеры — 6,2×5 м; перекрытия — сборные по главным балкам (594×594 мм); плиты перекрытия — CLT-панели длиной 18 м, толщиной 260 мм; ограждающие конструкции — навесные стеновые CLT-панели; связи жесткости — клееный брус 264×264 мм. Колонны и балки перекрытия — деревянные клееные элементы, плиты перекрытия — CLT-панели, лестнично-лифтовый узел — монолитный железобетон.

При строительстве многоэтажных и высотных зданий из ДКК с каркасно-связевой схемой [13] узловые решения опирания колонн на ростверки, стыковка колонн по высоте, сопряжение ригелей перекрытия и колонны выполнены в виде соединений, которые представляют собой «пакет» из нескольких

стальных пластин, расположенных с определенным шагом между собой. Стальные пластины могут изготавливаться различной формы с применением ЧПУ и свариваться через специальные «объединяющие» стальные пластины. В элементах предусматривают отверстия под стяжные болты. Данный тип соединения имеет низкую податливость и в расчетной схеме принят жестким.

Узлы сопряжения связей жесткости с пространственным каркасом здания приняты шарнирными. На рис. 1 представлена исследуемая конструктивная схема высотного здания. Сопряжения плит и ригелей перекрытия в объекте исследования приняты трех типов: жесткие, упругоподатливые, шарнирные.

#### Узловые соединения на механических связях

Исследованию податливости механических связей в деревянных, древоклееных и древокомпозитных конструкциях посвящен ряд работ [15–18]. Вместе с тем, при численном моделировании различных кон-

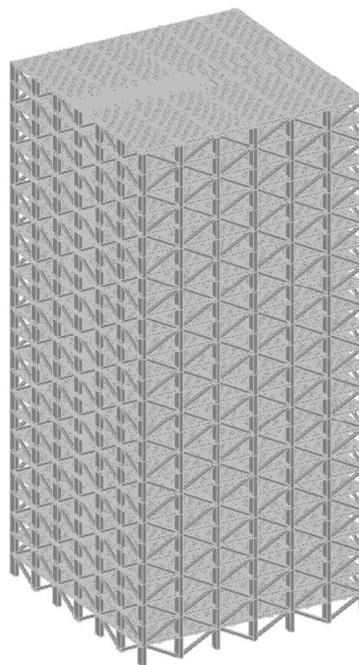


Рис. 1. Конструктивная схема высотного 25-этажного здания

структивных решений зданий обычно используют два условия опирания: шарнирное и/или жесткое. На практике узлы сопряжения конструкций не являются абсолютно шарнирными или жесткими. Для конструкций из стали и железобетона жесткая схема опирания в достаточной степени отражает реальные условия их закрепления вследствие высокого сопротивления металла и бетона смятию контактных поверхностей и больших значений модуля упругости этих материалов [19, 20]. Однако в случае с деревянными конструкциями податливость сопряжений крайне выражена, так как древесина вследствие своих анизотропных свойств имеет сравнительно невысокий модуль упругости (10 000 МПа) вдоль волокон и практически в 15–20 раз меньший поперек волокон. Точно также изменяются расчетные сопротивления смятию вдоль ( $R_{см0}=15,0$  МПа) и поперек волокон ( $R_{см90}=2,4$  МПа) согласно СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Поэтому учет податливости сопряжений деревянных конструкций крайне важен.

Для визуализации изменения внутренних усилий и общих перемещений в элементах высотного многоэтажного здания из деревокомпозитных конструкций в расчете использованы три типа связей сопряжения плит и балок перекрытия: жесткие, упругоподатливые, шарнирные. Узлы сопряжения главных балок с колоннами приняты жесткими вследствие применения укрупненных

стыков. Сопряжение треугольно-подкосных связей с элементами пространственного каркаса — шарнирное. Закрепление колонн и стен лестнично-лифтового узла в расчетах принято жестким (ограничение по направлениям  $x, y, z, U_x, U_y, U_z$ ).

В качестве упругоподатливых связей использованы три различных типа нагельных соединений: самонарезающие винты (рис. 2) [21], наклонно-ввинченные резьбовые стержни (рис. 3) [23], когтевые коннекторы со стальным винтом и/или гладким нагелем (рис. 4) [24].

В [22] исследована податливость самонарезающих винтов при работе на срез для обшивок из ориентированно-стружечной плиты (ОСП) при различных диаметре и глубине заделки нагелей, по которой приняты расчетные характеристики жесткости связей по методу экстраполяции значений для самонарезающих винтов диаметром 8 мм с заделкой 200 мм:  $C_x = C_y = 4600$  кН/м,  $C_z = 4000$  кН/м,  $U_x = U_y = 500$  кНм/рад,  $U_z = 100$  кНм/рад. Так как выполняемые расчеты являются тестовыми и ставят целью показать влияние податливости связей на изменение напряженно-деформированного состояния конструкций здания, то принятые параметры самонарезающих винтов с опорой на исследования [22] считаем правомерными. Однако в дальнейших исследованиях необходимо задаваться близкой к реальной податливостью соединений.

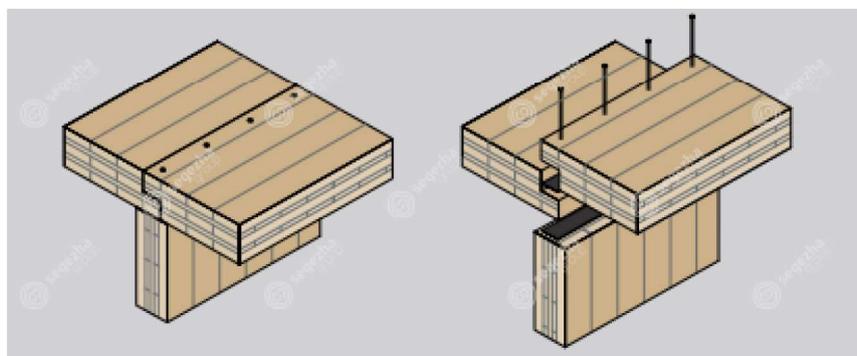


Рис. 2. Нагельные соединения с применением самонарезающих винтов [21]

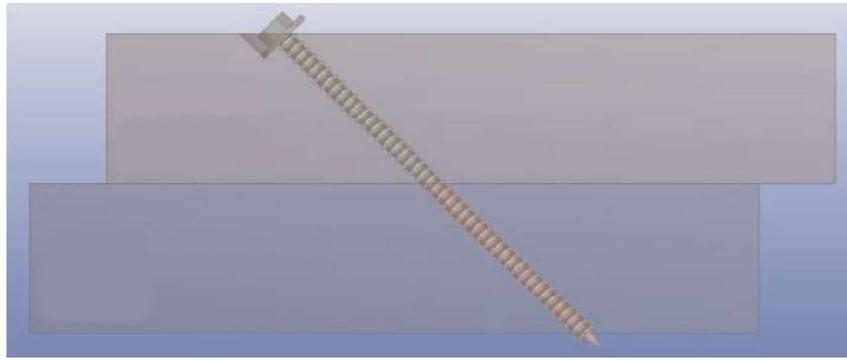


Рис. 3. Нагельные соединения с применением наклонно-ввинченных винтов [23]

Результаты исследований податливости наклонно-ввинченных резьбовых нагелей приняты из [24]:  $C_x = C_y = 16\,500$  кН/м,  $C_z = 10\,000$  кН/м,  $U_x = U_y = 1000$  кНм/рад,  $U_z = 100$  кНм/рад. Податливость соединения с применением когтевых коннекторов и стальных нагелей принята из [24]:  $C_x = C_y = 10\,550$  кН/м,  $C_z = 10\,000$  кН/м,  $U_x = U_y = 1000$  кНм/рад,  $U_z = 100$  кНм/рад.

Для учета и варьирования податливости связей в расчетных схемах здания использованы специальные упругие элементы (тип элемента 55). Элементы конечной жесткости позволяют задавать осевую, линейную и поворотную (угловую) жесткость узлов в плоскости действия осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [25, 26].

#### Методика исследования

Расчет численной модели здания для определения усилий  $M$ ,  $N$ ,  $Q$  и анализа

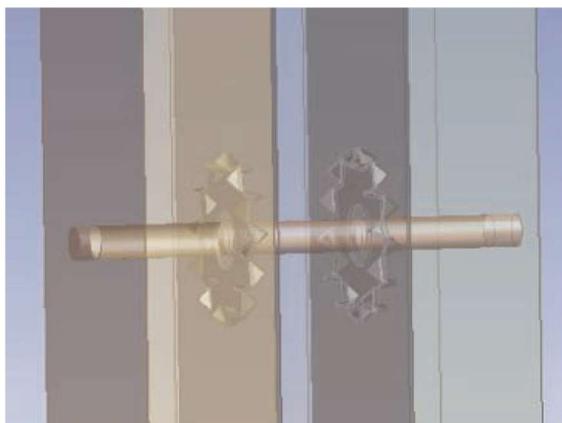


Рис. 4. Гладкие нагельные и/или винтовые соединения с когтевым коннектором [24]

напряженно-деформированного состояния элементов и узлов выполнен в ПК SCAD++, который позволяет учесть анизотропию древесины, податливость связей, тип грунтового основания. Тестовые расчеты выполнены без учета анизотропии древесины.

Постоянные, временные и кратковременные нагрузки для здания приняты согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», сейсмическая нагрузка — по СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Расчет здания произведен на расчетную ситуацию «РЗ» согласно п. 5.2. СП 14.13330.2018.

По результатам анализа 145 крупных населенных пунктов на территории России, находящихся в зонах высокой сейсмической опасности, для расчетов принята сейсмичность 8 баллов по шкале MSK-64.

Так как для исследований принята расчетная ситуация «РЗ» согласно СП 14.13330.2018, то расчет производим по линейно-спектральному методу. По данному методу переход от сейсмической нагрузки (динамического воздействия) к статической выполняется через коэффициент динамичности. В расчетах приняты коэффициенты, учитывающие: назначение сооружения и его ответственность — 1,0; допускаемые повреждения — 0,35; рассеивание энергии и колебаний — 1,0.

СП 14.13330.2018 предусматривает две зависимости коэффициента динамичности

для грунтов I, II и III, IV типов соответственно.

Исходя из указанного принимаем для расчета на сейсмическое воздействие грунты основания I и III типов.

**Результаты исследования**

Результаты полученных численных значений общих перемещений и максимальных усилий в связях конечной жесткости приведены на гистограммах (рис. 5–8). Значения максимальных внутренних усилий  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $Q_x$ ,  $Q_y$  элементов высотного многоэтажного здания при различных типах закрепления для различных грунтовых условий при действии сейсмической нагрузки по направлению  $x$  и  $y$  приведены в табл. 1, 2

соответственно. Значения изгибающих моментов  $M_x$ ,  $M_y$  приведены у заделки, где установлены жесткие связи.

**Обсуждение результатов**

Результаты расчета показывают, что с увеличением угловой и линейной податливости связей конечной жесткости между плитами перекрытия и балками изгибающие моменты на участке заделки колонн и перемещения при действии сейсмической нагрузки возрастают. Однако согласно работам [7, 27–29] одним из преимуществ зданий из деревянных и деревокомпозитных элементов является диссипация энергии в узлах конструкций вследствие высокой податливости сопряжений, что в итоге долж-



Рис. 5. Гистограмма максимальных перемещений здания при действии сейсмической нагрузки по направлению оси  $x$

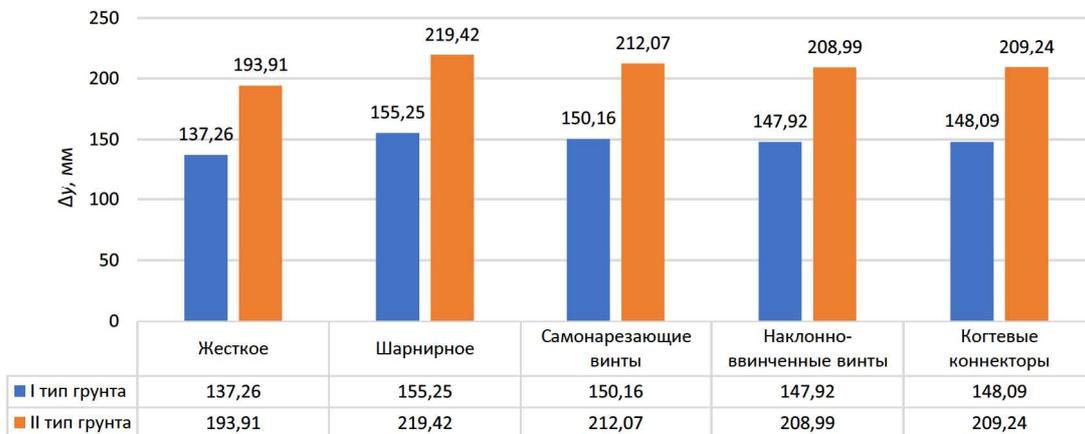


Рис. 6. Гистограмма максимальных перемещений здания при действии сейсмической нагрузки по направлению оси  $y$



Рис. 7. Гистограмма максимальных продольных усилий в связях при действии сейсмической нагрузки по направлению оси x



Рис. 8. Гистограмма максимальных продольных усилий в связях при действии сейсмической нагрузки по направлению оси y

но снизить отклик несущих элементов, т. е. уменьшить усилия и увеличить перемещения. Данная закономерность в нашем расчете частично не подтвердилась, что объясняется параметрами численных расчетов программно-вычислительного комплекса SCAD++ при расчете зданий и сооружений на сейсмическое воздействие по линейно-спектральной методике: отсутствует учет демпфирования материала (параметра затухания (в долях от критического)). Для устранения этого необходимо использовать метод прямого интегрирования уравнения движения во временной области с учетом демпфирования материала.

Максимальные перемещения здания  $\Delta x$  при сейсмическом воздействии в 8 баллов примем за 100 %. Тогда видим, что максимальные перемещения  $\Delta y$  уменьшаются для I и III типов грунтов на 25 %. Это объясняется большей пространственной жесткостью здания, так как главные балки перекрытия расположены вдоль оси  $y$ .

Максимальные перемещения элементов здания с упругоподатливыми и шарнирными связями по сравнению с жестким сопряжением при действии сейсмической нагрузки интенсивностью 8 баллов увеличились на 40 % для шарнирного опирания, на 28, 22, 23 % — для самонарезающих винтов,

Таблица 1

**Максимальные усилия в элементах конструкции здания при действии сейсмической нагрузки  
в направлении оси x**

№ п/п	Параметр	Категория грунтов	Способ закрепления перекрытия с балкой				
			Жесткое	Шарнирное	Самонарезающие винты	Накл.-ввин. винты	Когтевые коннекторы
1	Изгибающие моменты в наружных колоннах у заделки $M_x$ , кНм	I-II	415,9	329,9	322,0	341,9	334,9
2		III	580,8	457,7	449,1	478,1	468,1
3	Изгибающие моменты во внутренних колоннах у заделки $M_x$ , кНм	I-II	485,6	825,3	716,2	636,1	661,4
4		III	678,6	1165,6	1008,3	894,0	929,7
5	Усилия в главных балках перекрытия на опоре $Q_x$ , кН	I-II	303,4	124,8	156,3	196,5	178,2
6		III	417,9	175,0	217,8	273,3	247,9

Таблица 2

**Максимальные усилия в элементах конструкции здания при действии сейсмической нагрузки  
в направлении оси y**

№ п/п	Параметр	Категория грунтов	Способ закрепления перекрытия с балкой				
			Жесткое	Шарнирное	Самонарезающие винты	Накл.-ввин. винты	Когтевые коннекторы
1	Изгибающие моменты в наружных колоннах у заделки $M_y$ , кНм	I-II	422,2	426,3	395,2	390,4	391,7
2		III	595,3	591,4	548,8	542,5	544,2
3	Изгибающие моменты во внутренних колоннах у заделки $M_y$ , кНм	I-II	373,7	560,7	472,5	423,2	437,7
4		III	518,3	782,9	657,2	588,1	608,4
5	Усилия в главных балках перекрытия на опоре $Q_y$ , кН	I-II	23,0	8,7	10,8	13,2	12,3
6		III	32,2	12,0	14,6	18,1	16,9

наклонно-ввинченных винтов и нагельного соединения с когтевым коннектором соответственно. Максимальный изгибающий момент во внутренних колоннах увеличился на 70, 48, 31, 36 % для шарнирных и упругоподатливых связей соответственно.

Как видно из результатов расчета, неучет диссипативных свойств узловых соединений вследствие податливости связей значительно влияет на перераспределение внутренних усилий и, следовательно, на напряженно-деформированное состояние в элементах конструкции здания. Полученные максимальные горизонтальные перемещения элементов здания вполне удовлетворяют нормативным требованиям. Общая геометрическая неизменяемость и устойчивость здания в целом обеспечены регулярностью

несущих конструкций, расположением центра тяжести здания и наличием подкосно-треугольных связей по фасадам здания, что совпадает с требованиями, предъявляемыми к сейсмостойким зданиям [7, 27].

В качестве упругоподатливых связей использованы три различных типа нагельных соединений: самонарезающие винты, наклонно-ввинченные резьбовые стержни, когтевые коннекторы со стальным винтом и/или гладким нагелем как наиболее распространенные, простые в изготовлении и монтаже. Однако в условиях сейсмической нагрузки когтевые коннекторы со стальным винтом и/или гладким нагелем с нашей точки зрения наименее применимы. Объясняется это сравнительно низким пределом упругой работы узла (повышенная сдвигустрой-

чивость) вследствие больших знакопеременных усилий в элементах ДКК с этим типом соединения, а также развития пластических деформаций на зубьях когтевых конекторов, что в итоге может значительно сказаться на эксплуатационной надежности, устойчивости и работоспособности конструкции, возможности безаварийной эксплуатации и стоимости ремонтно-восстановительных работ после землетрясения. Наклонно-ввинченные резьбовые стержни считаем наиболее удачным решением из представленных для узловых соединений плит перекрытия с балками вследствие увеличения площади смятия, большей несущей способности и меньшей податливости, дробности передачи усилий при растяжении нагелей и смятии древесины в нагельном гнезде по сравнению с вертикальными самонарезающими винтами.

Так как древесина занимает особое место в строительстве вследствие ярко выраженных анизотропных свойств, считаем, что работа конструкции при действии сейсмической или иной динамической нагрузки должна проходить в упругой стадии, чтобы минимизировать повреждения конструкции и снижение несущей способности узловых соединений. Если объемно-планировочные решения здания с применением деревокомпозитных элементов не позволяют исключить пластическую работу древесины, то необходимо в наиболее нагруженных местах устраивать специальные элементы, воспринимающие и рассеивающие энергию движения в элементах ДКК при землетрясении. Поэтому в дальнейших расчетах на действие сейсмических нагрузок необходимо использовать метод прямого интегрирования уравнений движения, позволяющий учитывать демпфирующие свойства материала и узлов сопряжения. Полноценный учет диссипативных свойств узлов в деревянных и деревокомпозитных конструкциях, развитие упругих, упруго-вязких и пластических дефор-

ций рекомендуется выполнять в программном комплексе Ansys Workbench [30–34] и будет рассмотрен в следующих работах.

#### **Выводы**

1. Выполнены тестовые расчеты каркасного многоэтажного высотного здания из деревокомпозитных элементов с учетом различной податливости связей: жестких, шарнирных, самонарезающих и наклонно-ввинченных винтов, конекторов со стальными гладкими нагельями.

2. Получены значения усилий и перемещений элементов здания с учетом различной податливости связей при интенсивности землетрясения в 8 баллов I и III типа грунтов.

3. Учет податливости связей сопряжения плит перекрытия с балками показал, что перемещения элементов здания в зависимости от типа связи увеличиваются до 28 % по сравнению с жесткими узлами. Максимальные изгибающие моменты во внутренних колоннах у заделки увеличились на 70, 48, 31, 36 % для шарнирных и упругоподатливых связей соответственно.

4. Введение упругоподатливых связей в расчетную схему приводит к существенному изменению и перераспределению внутренних усилий и общих перемещений в конструктивных элементах здания, что повышает достоверность расчетов несущей способности конструкций.

5. Изучение диссипативных свойств узлов сопряжений с учетом податливости связей деревянных и деревокомпозитных конструкций в условиях сейсмике требует дополнительных исследований с использованием специальных программ, например Ansys Workbench, а также проведения экспериментов.

#### **Библиографический список**

1. *Завриев К. С.* Динамическая теория сейсмостойкости // Труды Закавказского института сооружений. Тбилиси, 1936. Вып. 29. 205 с.

2. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил // Ереван: АН АрмССР, 1959. 286 с.
3. Хачиян Э. Е. Расчет сооружений на сейсмостойкость с применением электронных вычислительных машин // Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат, 1961. С. 55–60.
4. Травуш В. И., Белостоцкий А. М., Вершинин В. В., Островский К. И., Петряшев Н. О., Петряшев С. О. Численное моделирование физически нелинейной динамической реакции высотных зданий при сейсмических воздействиях уровня МРЗ // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2016. № 1. С. 117–139.
5. Biot M. Theory of vibration of building during earthquake // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. Band 14. Heft 4. Berlin, 1934. S. 213–223.
6. Сюэхиро К. Инженерная сейсмология. М.: Экономическая жизнь, 1935. 168 с.
7. Ньюмарк Н., Розенблюэт Э. Основы сейсмостойкого строительства: сокр. пер. с англ. / под ред. Я. М. Айзенберга. М.: Стройиздат, 1980. 344 с.
8. Ceccotti A., Folessa M., Lauriola M., Sandhaas C. Which seismic behaviour factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels? // CNR-IVALSA. Italy. Japan. 2013. Pp. 1–8.
9. Ceccotti A., Sandhaas C., Okabe M., Yasumura M., Minowa S., Kawai N. SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building Earthquake Engng Struct. Dyn. 2013; 42. Pp. 2003–2021.
10. Garvic I., Fragiaco M., Ceccotti A. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures // Materials and Structures. Italy. RILEM. 2014. Pp. 1–17.
11. Лабудин Б. В., Чередниченко В. В., Карельский А. В., Попов Е. В. НДС в элементах и узлах многоквартирного здания из CLT-панелей в условиях сейсмике // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2023. № 3 (27). С. 12–22.
12. Чередниченко В. В., Лабудин Б. В., Карельский А. В., Попов Е. В. Исследование сейсмостойкости многоэтажного жилого дома из CLT-панелей // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Курск, 18 ноября 2023 г. С. 166–172.
13. Erdogan D., Beges H. Tall Timber Architecture: An Opportunity for Green Building as Mjøstårnet // International Symposium of Architecture, Technology and Innovation ATI2021. Izmir. Turkey. 2021. Pp. 16–27.
14. Чередниченко В. В., Попов Е. В., Карельский А. В., Лабудин Б. В. Численные исследования конструктивных решений высотных зданий из деревокомпозитных элементов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2023. № 4 (28). С. 12–22.
15. Лабудин Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: АГТУ, 2007. 267 с.
16. Жаданов В. И., Украинченко Д. А., Инжутов И. С., Мельников И. И., Пинайкин И. И. Учет дефектов изготовления и монтажа при расчете крупноразмерных клефанерных плит // Вестник Поволжского государственного университета. 2019. № 4 (12). С. 59–68.
17. Попов Е. В., Тюрикова Т. В., Поликарпов Д. А., Тропина П. М., Лабудин Б. В., Мелехов В. И. Инженерный расчет ребристых деревокомпозитных панелей с упругодеформируемыми связями // Наука сегодня. Теоретические и практические аспекты: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Вологда, 28 дек. 2016 г. Ч. 1. Вологда, 2017. С. 53–57.
18. Дмитриев П. А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск: НГАСУ, 1975. 529 с.
19. Турков А. В. Взаимосвязь задач динамики и статки сплошных и составных деревянных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. Орел: ОГТУ, 2008. 386 с.
20. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов // М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
21. Циулин Е. Ю., Жилудова М. А., Гора П. С., Чубарук В. А., Плеханова М. А., Петик А. В. Каталог типовых узловых изделий из перекрестно-клееной древесины (CLT) // Segezha CLT manual. 2022. 101 с.
22. Чернова Т. П. Совершенствование конструкции и технологии сопряжения CLT-панелей с деревоклееными элементами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2018. 122 с.
23. Русланова А. В. Совершенствование конструкции и технологии изготовления деревокомпозитных панелей: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. 178 с.
24. Орлов А. О. Совершенствование узловых соединений элементов деревянных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2019. 138 с.
25. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Фиалко С. Ю., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD++. М., 2015. 850 с.

26. Сливкер В. И. Эффективные схемы метода конечных элементов в задачах строительной механики с использованием новых вариационных подходов: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1983. 396 с.

27. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.

28. Белаиш Т. А., Иванова Ж. В. Деревянные конструкции в сейсмостойком строительстве зданий и сооружений (отечественный и зарубежный опыт) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 3. С. 57–60.

29. Иванова Ж. В. Исследование сейсмостойкости каркасных деревянных зданий с учетом нелинейно-упругих и диссипативных свойств материала элементов: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2000. 217 с.

30. Агапов В. П. МКЭ в статике, динамике и устойчивости конструкций. М.: АСВ, 2000. 152 с.

31. Бондаренко В. М. Диссипация энергии при силовом деформировании конструкции как фактор повышения живучести сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 4 (219). С. 78–81.

32. Победра Б. Е. Диссипация энергии в теории вязкоупругости // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика, механика. 2003. № 4. С. 35–46.

33. Ларионов Е. А. Устойчивость сжатого стержня с учетом диссипации энергии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 48–57.

34. Бондаренко В. М., Рищин В. И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. М.: Студент, 2015. 110 с.

## References

1. Zavriev K. S. *Dinamicheskaya teoriya seysmostoykosti* [Dynamic theory of earthquake resistance]. *Trudy Zakavkazskogo instituta sooruzheniy* [In: Proceedings of the Transcaucasian Institute of Structures]. Tbilisi, 1936, iss. 29, 205 p.

2. Nazarov A. G. *Metod inzhenernogo analiza seysmicheskikh sil* [Method of engineering analysis of seismic forces]. Erevan, AN Arm SSR Publ., 1959, 286 p.

3. Khachiyani E. E. *Raschet sooruzheniy na seysmostoykost' s primeneniem elektronnykh vychislitel'nykh mashin* [Calculation of structures for earthquake resistance using electronic computing machines]. *Snizhenie stoimosti i uluchshenie kachestva seysmostoykogo stroitel'stva* [In: Reduction of cost and improvement of quality of earthquake-resistant construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1961, pp. 55–60.

4. Travush V. I., Belostotskiy A. M., Vershinin V. V., Ostrovskiy K. I., Petryashev N. O., Petryashev S. O. *Chislennoe modelirovaniye fizicheskoy nelineynoy dinamicheskoy reaktivnoy vysotnykh zdaniy pri seysmicheskikh vozdeystviyakh*

*urovnya MRZ* [Numerical modeling of physically nonlinear dynamic response of high-rise buildings under seismic effects of MRZ level]. *Mezhdunarodniy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktсий – International Journal of Civil and Building Structures Calculation*, 2016, no. 1, pp. 117–139.

5. Biot M. Theory of vibration of building during earthquake. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, Band 14, Heft 4. Berlin, 1934, pp. 213–223.

6. Syuekhiro K. *Inzhenernaya seysmologiya* [Engineering Seismology]. Moscow, *Ekonomicheskaya zhizn'* Publ., [In: Economic life], 1935, 168 p.

7. N'yumark N., Rozenblyuet E. *Osnovy seysmostoykogo stroitel'stva* [Fundamentals of earthquake engineering]. Transl. from Eng., ed. by Ayzenberg Ya. M. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 344 p.

8. Ceccotti A., Folessa M., Lauriola M., Sandhaas C. Which seismic behaviour factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels? *CNR-IVALSA*, Italy, Japan, 2013, pp. 1–8.

9. Ceccotti A., Sandhaas C., Okabe M., Yasumura M., Minowa C., Kawai N. SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2013; 42, pp. 2003–2021.

10. Garvic I., Fragiaco M., Ceccotti A. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. *Materials and Structures*, Italy, RILEM, 2014, pp. 1–17.

11. Labudin B. V., Cherednichenko V. V., Karelskiy A. V., Popov E. V. *NDS v elementakh i uzlakh mnogokvartirnogo zdaniya iz CLT-paneley v usloviyakh seysmiki* [NDS in elements and nodes of an apartment building made of CLT-panels under seismic conditions]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii» – Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series “Materials. Constructions. Technologies”*, 2023, no. 3 (27), pp. 12–22.

12. Cherednichenko V. V., Labudin B. V., Karelskiy A. V., Popov E. V. *Issledovanie seysmostoykosti mnogoetazhnogo zhilogo doma iz CLT-paneley* [Investigation of earthquake resistance of multistory residential building from CLT-panels]. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya* [In: Safety of the building stock of Russia. Problems and solutions]. Kursk, November 18, 2023, pp. 166–172.

13. Erdogan D., Begec H. Tall Timber Architecture: An Opportunity for Green Building as Mjøstårnet. *International Symposium of Architecture, Technology and Innovation ATI2021*, Izmir, Turkey, 2021, pp. 16–27.

14. Cherednichenko V. V., Popov E. V., Karelskiy A. V., Labudin B. V. *Chislennyye issledovaniya konstruktivnykh*

resheniy vysotnykh zdaniy iz derevokompozitnykh elementov [Numerical studies of structural solutions of high-rise buildings from wood-composite elements]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii» – Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series “Materials. Constructions. Technologies”*, 2023, no. 4 (28), pp. 12–22.

15. Labudin B. V. *Sovershenstvovanie kleennykh derevyannykh konstruktsiy s prostranstvenno-regulyarnoy strukturoy*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improvement of glued wooden structures with spatial-regular structure. Dr. Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, AGTU Publ., 2007, 267 p.

16. Zhadanov V. I., Ukrainchenko D. A., Inzhutov I. S., Mel'nikov P. P., Pinaykin I. P. *Uchet defektov izgotovleniya i montazha pri raschete krupnorazmernykh kleefanernykh plit* [Accounting for manufacturing and assembly defects in the calculation of large-size glue-faced panels]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Volga State University*, 2019, no. 4 (12), pp. 59–68.

17. Popov E. V., Tyurikova T. V., Polikarpov D. A., Tropina P. M., Labudin B. V., Melekhov V. I. *Inzhenernyy raschet rebristyykh derevo kompozitnykh paneley s uprugoy deformiruemymi svyazyami* [Engineering calculation of ribbed wood composite panels with elastically deformable joints]. *Nauka segodnya. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty. Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Vologda, 28 dek. 2016 g.* [Science today. Theoretical and practical aspects. Proceedings of the international scientific and practical conference, Vologda, 28 Dec., 2016]. Pt. 1, Vologda, 2017, pp. 53–57.

18. Dmitriev P. A. *Eksperimental'nye issledovaniya soedineniy elementov derevyannykh konstruktsiy na metallicheskiykh i plastmassovykh nagelyakh i teoriya ikh rascheta s uchetom uprugoy-vyazkikh i plasticheskikh deformatsiy*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Experimental studies of joints of elements of wooden structures on metal and plastic dowels and the theory of their calculation taking into account elastic-viscous and plastic deformations. Dr. Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, NGASU Publ., 1975, 529 p.

19. Turkov A. V. *Vzaimosvyaz' zadach dinamiki i statiki sploshnykh i sostavnykh derevyannykh konstruktsiy*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Interrelation of problems of dynamics and statics of solid and composite wooden structures. Diss. Sci. Tech. diss.]. Orel, OGTU Publ., 2008, 386 p.

20. Ashkenazi E. K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978, 224 p.

21. Tsiulin E. Yu., Zhiludova M. A., Gora P. S., Chubaruk V. A., Plekhanova M. A., Petik A. V. *Katalog tipovykh uzlovykh izdeliy iz perekrestno-kleenoy drevesiny (CLT)* [Catalog of typical nodular products from cross-

laminated timber (CLT)]. Segezha CLT manual, 2022, 101 p.

22. Chernova T. P. *Sovershenstvovanie konstruktsii i tekhnologii sopryazheniya CLT-paneley s derevokleenyimi elementami*. Diss. kand. Tech. nauk [Improvement of design and technology of mating of CLT-panels with wood-glued elements. PhD in Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, SAFU im. M. V. Lomonosova Publ., 2018, 122 p.

23. Ruslanova A. V. *Sovershenstvovanie konstruktsii i tekhnologii izgotovleniya derevokompozitnykh paneley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of design and manufacturing technology of wood-composite panels. PhD in Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, SAFU im. M. V. Lomonosova Publ., 2021, 178 p.

24. Orlov A. O. *Sovershenstvovanie uzlovykh soedineniy elementov derevyannykh konstruktsiy*. Diss. kand. Tech. nauk [Perfection of nodal joints of elements of wooden constructions. PhD in Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, SAFU im. M. V. Lomonosova, 2019, 138 p.

25. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A. A., Fialko S. Yu., Perel'muter A. V., Perel'muter M. A. *SCAD Office. Vychislitel'nyy kompleks SCAD++* [SCAD Office. SCAD ++ Computing Complex]. Moscow, 2015, 850 p.

26. Slivker V. I. *Effektivnye skhemy metoda konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki s ispol'zovaniem novykh variatsionnykh podkhodov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Efficient schemes of the finite element method in problems of structural mechanics using new variational approaches. Dr. Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1983, 396 p.

27. Birbraer A. N., *Raschet konstruktsiy na seysmostoykost'* [Calculation of structures for earthquake resistance]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1998, 255 p.

28. Belash T. A., Ivanova Zh. V. *Derevyannye konstruktsii v seysmostoykom stroitel'stve zdaniy i sooruzheniy (otechestvennyy i zarubezhnyy opyt)* [Wooden structures in earthquake-resistant construction of buildings and structures (domestic and foreign experience)]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic-Resistant Construction. Safety of Structures*, 2015, no. 3, pp. 57–60.

29. Ivanova Zh. V. *Issledovanie seysmostoykosti karkasnykh derevyannykh zdaniy s uchetom nelineynoy uprugikh i dissipativnykh svoystv materiala elementov*. Diss. kand. Tech. nauk [Investigation of seismic resistance of timber frame buildings taking into account nonlinear-elastic and dissipative material properties of elements. PhD in Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, St. Petersburg, PGUPS Publ., 2000, 217 p.

30. Agapov V. P. *MKE v statike, dinamike i ustoychivosti konstruktsiy* [FEM in statics, dynamics and stability of structures]. Moscow, ASV Publ., 2000, 152 p.

31. Bondarenko V. M. *Dissipatsiya energii pri silovom deformirovanii konstruksii kak faktor povysheniya zhivuchesti sooruzheniy* [Dissipation of energy at force deformation of the structure as a factor of structure's survivability increase]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural mechanics and design of structures*, 2008, no. 4 (219), pp. 78–81.

32. Pobedrya B. E. *Dissipatsiya energii v teorii vyazkouprugosti* [Dissipation of energy in the theory of viscoelasticity]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1. Matematika, mekhanika – Bulletin of Moscow*

*University. Series 1. Mathematics, Mechanics*, 2003, no. 4, pp. 35–46.

33. Larionov E. A. *Ustoychivost' szhatogo sterzhnya s uchetom dissipatsii energii* [Stability of a compressed rod with consideration of energy dissipation]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy – Construction Mechanics of Engineering Designs and Structures*, 2015, no. 4, pp. 48–57.

34. Bondarenko V. M., Rishchin V. I. *Dissipativnaya teoriya silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [Dissipative theory of force resistance of reinforced concrete]. Moscow, Student Publ., 2015, 110 p.