

Владимирский государственный университет

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебное пособие

Владимир 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2024

ISBN 978-5-9984-1811-2

© ВлГУ, 2024

УДК 004.95:624.012
ББК 32.973+38.5

Авторы: А. В. Лукина, В. А. Репин, Д. А. Чибрикин,
М. С. Сергеев, С. И. Рощина

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций
Донского государственного технического университета
Д. Р. Маилян

Кандидат технических наук, доцент
зав. кафедрой автомобильных дорог
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А. В. Вихрев

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Компьютерное моделирование деревокомпозитных конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. В. Лукина [и др.] ; Владимир. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2024. – 123 с. – ISBN 978-5-9984-1811-2. – Электрон. дан. (6,83 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Изложены основные вопросы расчета и проектирования деревокомпозитных конструкций. Рассмотрены примеры расчетов армированных и деревокомпозитных балок. Численные исследования деревокомпозитных балок выполнены в ПК «Lira».

Предназначено для обучения студентов высших учебных заведений и выполнения научно-исследовательской работы в условиях уровневой подготовки специалистов по направлениям 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 11. Ил. 77. Библиогр.: 21 назв.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ И ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ	7
1.1. Свойства древесины как конструкционного материала	7
1.2. Модификация как способ улучшения физико-механических свойств древесины	10
1.3. Характеристика и область применения полимерных материалов	14
1.4. Армирующие композиционные материалы на основе искусственных волокон, тканей и лент.....	18
1.5. Виды деревокомпозитных материалов.....	25
Вопросы для самопроверки	28
Глава 2. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЯХ	29
2.1. История многоэтажного деревянного домостроения	29
2.2. Деревянное многоэтажное строительство за рубежом.....	34
2.3. Опыт высотного деревянного домостроения в России	38
Вопросы для самопроверки	41
Глава 3. РАСЧЕТ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	42
3.1. Инженерный метод расчета деревокомпозитных конструкций	42
3.2. Пример расчета двускатной дощато-клееной балки, армированной стальной арматурой.....	56
Вопросы для самопроверки	62
Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ДЕРЕВОКОМПОЗИТНОГО ЗДАНИЯ В ЧИСЛЕННОМ ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ.....	64
4.1. Разработка модели каркаса многоэтажного деревокомпозитного здания в программном комплексе ПК STARK ES.....	64
4.1.1. Исходные данные для расчета	64

4.1.2. Начало работы	65
4.1.3. Формирование геометрической модели.....	67
4.1.4. Назначение характеристик материала.....	68
4.1.5. Установка опор	70
4.1.6. Назначение нагрузок	71
4.1.7. Выполнение статического расчета	75
4.1.8. Анализ результатов расчета	75
4.2. Разработка модели каркаса многоэтажного деревянокомпозитного здания в программном комплексе ПК SCAD	80
4.2.1. Запуск программы SCAD и подготовка к созданию расчетной схемы	80
4.2.2. Исходные данные для расчета	81
4.2.3. Жесткостные характеристики	81
4.2.4. Сечение элементов несущих конструкций.....	83
4.2.5. Назначение опорных связей и шарниров в узлах элементов.....	85
4.2.6. Загружение расчетной схемы.....	86
4.2.7. Комбинация загружений и расчетные сочетания усилий	92
4.2.8. Анализ результатов расчета	93
4.3. Численное моделирование деревянокомпозитной балочной конструкции в программном комплексе ЛИРА 10.10.....	94
Вопросы для самопроверки	105
Глава 5. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕРЕВЯНОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	106
5.1. Особенности технологии изготовления армированных деревянных конструкций	106
5.2. Особенности процесса вклеивания арматуры в деревянные заготовки конструкций	111
Вопросы для самопроверки	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЯ	119

ВВЕДЕНИЕ

Дерево – один из первых природных строительных материалов, используемых человечеством. Этот природный материал широко применяется и сегодня. Однако инженерный имидж дерева был низкотехнологичным, поскольку использование древесины было основано больше на традициях и опыте, чем на инженерных принципах. С другой стороны, древесина является одним из важных материалов с чрезвычайно широким объемом потребления. Например, объем потребления бревен в мире достигает около 3400 млн м³. Из этого количества, которое равно почти 10⁹ т, около 1500 млн м³ используется для промышленных нужд, что соответствует объему производства стали в мире. Более половины этого объема используется при производстве конструкционных материалов, таких как балки и колонны.

Согласно данным Министерства природных ресурсов Российской Федерации запас древесины в нашей стране насчитывает 82 млрд м³, что составляет более четверти мировых запасов. Совокупность высоких механических характеристик, малого удельного веса, простоты обработки и богатой лесосырьевой базы нашей страны позволяет древесине по многим аспектам составить жесткую конкуренцию стальным конструкциям, например в строительстве предприятий с химически агрессивным технологическим процессом, при возведении радиопрозрачных зданий, а по сейсмостойкости и восприятию динамических нагрузок превосходить их.

Строительный сектор оказывает чрезвычайно высокую нагрузку на окружающую среду. Согласно текущим расчетам на этот сектор приходится 35 % мирового спроса на первичную энергию и 38 % мировых выбросов [18].

Одним из подходов к снижению негативного воздействия, связанного с застроенной средой, является увеличение использования деревянных несущих материалов при строительстве многоэтажных зданий. Так называемое многоэтажное деревянное строительство стало возможным благодаря технологическим достижениям, позволяющим конструкционным деревянным изделиям заменять бетонные несущие

элементы. Такая замена может привести к сокращению мирового производства цемента и связанных с ним выбросов углекислого газа. Увеличение спроса на конструкционную древесину может расширить цепочку поставок лесоматериалов, распространяющихся на управление лесным хозяйством и другие структуры землепользования. Многоэтажные деревянные здания остаются технологической инновацией, которая конкурирует с другими устоявшимися практиками строительства, в основном с производством многоэтажных бетонных зданий.

В свою очередь, эффективность применения деревянных конструкций может быть повышена за счет армирования материалами из углеволокна на полимерной матрице и модификации древесины сжатой зоны. Решение данной задачи позволит при увеличении прочности и жесткости снизить материалоемкость и монтажную массу конструкций, уменьшить влияние анизотропии свойств и пороков древесины на несущую способность.

Учебно-методическая цель пособия – ознакомить студентов с современными прогрессивными видами зданий и сооружений, выполненных с применением композитных конструкций, а также обеспечить механическую безопасность на стадии проектирования и в процессе эксплуатации; привить студентам исследовательский подход к изучению наиболее сложных разделов основного курса «Конструкции из дерева и пластмасс» бакалавриата и «Индустриальные деревянные конструкции» магистратуры.

Пособие предназначено для проведения практических занятий во время изучения данных дисциплин и может быть полезно для инженерно-технических работников проектных и эксплуатационных организаций.

Глава 1. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ И ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

1.1. Свойства древесины как конструкционного материала

Древесина – совокупность проводящих, механических и запасяющих тканей, расположенных в стволах, ветвях и корнях древесных растений между корой и сердцевиной [11].

Древесина как конструкционный материал используется во многих областях промышленности и технологий. Сочетание высоких физико-механических свойств древесины, которая имеет меньший удельный вес по сравнению с металлом и железобетоном, определяет высокий спрос на древесину в строительстве, а максимальный эффект достигается при изготовлении несущих конструкций.

Так, хвойные породы древесины при средней плотности 500 кг/м^3 в 15,7 раза легче стали и в 4,8 раза легче бетона, что позволяет значительно снизить материальные затраты при возведении зданий и сооружений. Удельная прочность древесины всего на 4,4 % меньше, чем стали, и на 122 % выше, чем бетона [10].

Коэффициент линейного температурного расширения вдоль волокон древесины в 7 – 10 раз меньше, чем поперек волокон, и в 2 – 3 раза меньше, чем у стали [8]. Это приводит к экономии материалов при строительстве зданий из деревянных конструкций из-за отсутствия необходимости в температурных швах.

Результатом трубчатой слоистой структуры древесных клеток является их низкая теплопроводность. Это напрямую зависит от плотности и влажности материала. Низкая теплопроводность древесины становится предпосылкой для ее использования в качестве материала для ограждающей конструкции отапливаемого здания, в результате чего толщина стен может быть значительно уменьшена.

Дерево – это материал, который более химически устойчив, чем металл или железобетон. Использование деревянных конструкций выгодно для строительства складов сильно эродированных сыпучих материалов, таких как калийные и натриевые соли, минеральные удобрения. В зависимости от типа химической эрозии деревянные конструк-

ции могут использоваться без дополнительной защиты или защищаться поверхностной пропиткой или покраской, что может значительно расширить сферу их применения [12].

Использование деревянных зданий повышает их сейсмостойкость. Из-за малого удельного веса деревянных конструкций результирующая сила инерции невелика, что значительно меньше силы инерции других конструкций, таких как каменная кладка, сталь и железобетон. Кроме того, гибкость узлов деревянных конструкций способствует ослаблению деформации из-за трения между контактирующими поверхностями. Примерами высокой сейсмостойкости деревянных зданий являются ряд башенных сооружений в сейсмоопасных районах Японии и Китая [18].

Важным недостатком древесины как конструкционного материала можно назвать анизотропию ее свойств. Это результат анатомии древесины (макроструктуры) и микроструктуры составляющих ее клеточных мембран. Основным веществом, из которого состоит многослойная клеточная мембрана (стенка), выступает целлюлоза. Базовые фибриллы (от латинского *fiber* – волокно) представляют собой пучки макромолекул целлюлозы, которые имеют кристаллическую структуру во многом благодаря правильному расположению молекул. В клеточной стенке есть слои, каждый из которых имеет различную ориентацию микрофибрилл целлюлозы. Прочность клеточных мембран определяется их компонентами – микрофибриллами и аморфными лигнинами.

Итак, даже в мельчайшей структуре древесных веществ – микрофибриллах и клеточных мембранах – присутствуют элементы ориентаций, и как следствие наблюдаются различия в механических свойствах вещества. Хвойные и лиственные деревья состоят из разного набора анатомических элементов, в которых их упорядоченная волокнистая структура является общей. Механическую (поддерживающую) функцию хвойных деревьев выполняет в основном трахея, которая расположена вертикально в растущем дереве и занимает 90 % его объема. Расположение древесных волокон вдоль оси дерева приводит к резкой разнице в механических свойствах древесины вдоль и поперек ствола. Модуль упругости сосны относительно направления вдоль волокон примерно в 40 раз больше, чем поперек волокон, прочность на сжатие – в 10 раз, а прочность на растяжение – в 20 – 30 раз больше [16].

Дефекты древесины существенно влияют на несущую способность элементов строительной конструкции. Видимыми дефектами считаются недостатки отдельных частей древесины, которые снижают ее качество и ограничивают возможность ее использования [12]. Согласно ГОСТ 8486-86 различают следующие группы дефектов: сучки, трещины, дефекты формы ствола, дефекты структуры древесины, грибковые поражения, биологические повреждения, инородные тела и дефекты, коробление.

Сортность определяет количество пороков, их вид и размер, в общем случае определяют область применения древесины в элементах строительных конструкций в зависимости от вида напряженно-деформированного состояния [1].

Несмотря на вышесказанное, древесина занимает важное место в проектировании зданий и сооружений различного назначения, обладает неоспоримыми преимуществами при строительстве объектов с химически агрессивными технологическими процессами, а в строительстве на территориях, подверженных землетрясениям, является экологически чистым материалом.

Вопросами изучения, испытания, разработки проектной и нормативно-правовой документации для деревянных конструкций занимаются в АО ЦНИИПромзданий, ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, АО «НИЦ Строительство», НПО ЦНИИФ, ЦНИИМОД, ВлГУ, НГАСУ (Сибстрин), ННГАСУ, ОГУ, СПбГАСУ, ИРНТУ, ТОГУ и др.

Большой вклад в развитие деревянных конструкций, изучение физико-механических свойств цельной и клееной древесины внесли ученые Е. К. Ашкенази, Д. К. Арленинов, Ю. М. Иванов, Г. Г. Карлсен, Л. М. Ковальчук, В. Г. Котлов, Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов, А. Я. Найчук, С. И. Рощина, Е. Н. Серов, Ю. В. Слицкоухов, А. В. Турков, Б. Н. Уголев, Я. Ф. Хлебной, В. М. Хрулев, В. Г. Шухов, В. Ю. Щуко и др.

1.2. Модификация как способ улучшения физико-механических свойств древесины

Одним из способов повышения физико-механических свойств древесины является ее модификация. Модифицирование древесины – процесс направленного изменения физико-механических, теплофизических, триботехнических, биохимических свойств древесины применительно к условиям эксплуатации изделий из нее [12].

В конце 1930-х годов в авиационной промышленности нашей страны возникла необходимость в новых материалах для улучшения характеристик планеров. Механические свойства древесины, которая ранее использовалась в несущих элементах, были исчерпаны. В то время алюминий был ограничен в использовании, и его производство не соответствовало потребностям авиации.

В решении этой проблемы важную роль играли модернизация заводов и внедрение технологии производства дюралюминиевых сплавов для самолетов. В 1940 году были завершены эксперименты по созданию древесно-слоистых пластиков, таких как дельта-древесина, бакелитовая фанера, балинит, были определены физико-механические характеристики этих материалов. Дельта-древесина для авиации изготавливалась путем горячего прессования березового шпона толщиной 0,5 мм, пропитанного специальными смолами. Временное сопротивление растяжению дельта-древесины составляло 27 кг/мм², что сравнимо с некоторыми видами металлических сплавов. Таким образом, был создан качественно новый конструкционный материал, по своим характеристикам приближенный к металлам.

Наиболее глубокие исследования и широкая производственная проверка в области модифицирования древесины были проведены в СССР, и к настоящему моменту можно выделить четыре основных направления модификации, закрепленных в государственных нормах: термохимическая (радиационно-химическая), термомеханическая, химическая и химико-механическая.

Термохимическое модифицирование основано на пропитке древесины синтетическими мономерами и олигомерами с последующей полимеризацией и отверждением термokatалитическим или радиационным способами [15]. Технологический процесс насыщения древесины модифицирующим составом схож с пропиткой антисептиками и

антипиренами, проводится по способу вакуум – давление или вакуум – давление – вакуум при температуре 20 – 30 °С. Количество поглощенного пропиточного состава принимается равным 30 – 80 % от массы исходной древесины.

В качестве модификаторов используются составы мономеров и олигомеров (фенолспирты, фурановые, ацетатные смолы, метилметакрилат, стиролметилметакрилат, стиролвинилацетат, полиэфирные смолы, стирол полиэфирных смол и др.), а также поликонденсационных смол (фенолформальдегидных, эпоксидных, фурановых, карбамидоформальдегидных и др.), условная вязкость которых по вискозиметру ВЗ-4 должна составлять 11 – 14 с при температуре 20 °С. Жизнеспособность модификатора должна обеспечивать полный технологический цикл пропитки древесины [17]. Отверждение состава может производиться радиационным и термokatалитическим способами.

Первый метод был разработан в Соединенных Штатах Америки и Советском Союзе в 1960-х годах, и было налажено промышленное производство модифицированной древесины радиохимическими методами. Суть способа заключается в впрыскивании инертного газа в герметичный контейнер после процесса пропитки древесины модификатором с дальнейшей ионизацией под воздействием гамма-лучей для инициирования полимеризации. К недостаткам данного способа можно отнести высокие энергозатраты на облучение обрабатываемой детали, обеспечивающие безопасные условия труда. Преимуществами данного способа следует считать отсутствие химического инициатора отверждения и высокий уровень контроля процесса полимеризации модификатора.

В отличие от радиационного термokatалитический метод отверждения модификаторов не требует организации сложных технических процессов, и его реализация возможна, если автоклав и сушильная камера пропитываются составом в процессе производства, что значительно упрощает процесс внедрения данного метода в деревообрабатывающую промышленность. Номенклатура используемых пропиточных составов значительно шире. Поэтому помимо мономеров (фенольный спирт, метилметакрилат, стирол, виниловые мономеры и олигомеры) они широко используются в радиационно-химической модификации полимерных композиций поликонденсационных смол (фенол-

формальдегидных, эпоксидных, меламиновых, карбамидных, фурановых и др.). Их используют при изготовлении активно склеиваемых деревянных конструкций.

В результате термохимической модификации получают древесно-полимерный композит с высокими физико-механическими свойствами. Прочность древесины в зависимости от используемого модификатора при сжатии вдоль волокон увеличивается в 1,5 – 2 раза, поперек волокон – в 2 – 6 раз, истираемость снижается в 1,5 – 2 раза, а водопоглощение – более чем в 2 раза.

Вопросы термохимической модификации древесины поднимались в работах А. С. Фрейдина, Г. М. Шутова, Ю. В. Вихрова, М. В. Гринбург, Ю. В. Анненкова, А. J. Stamm, J. A. Meyer, B. S. Bryant, A. E. Witt.

Термомеханическое модифицирование – модифицирование предварительно нагретой пропаренной, сухой или наполненной древесины уплотнением с последующей высокотемпературной сушкой и термообработкой [15]. Процесс прессования древесины получил наибольшее распространение и широкую научно-производственную базу в СССР. Основные виды термомеханической модификации согласно ГОСТ 24329-80 представлены на рис. 1.1 в виде схемы. Основные положения технологического процесса были сформулированы и развиты в трудах Н. Т. Нысенко и П. Н. Хухрянского.

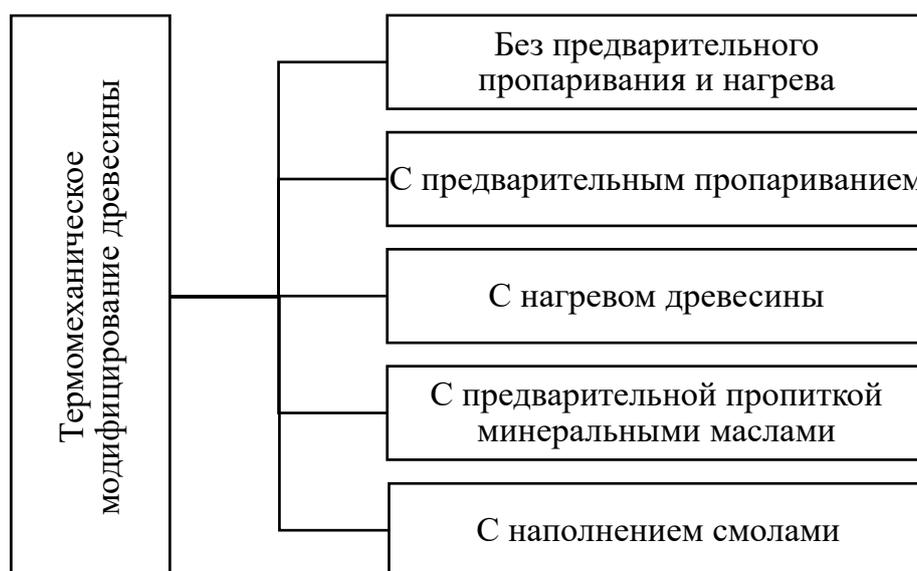


Рис. 1.1. Виды термомеханической модификации согласно ГОСТ 24329-80

По способу термомеханической модификации древесина уплотняется в пресс-формах до требуемой прочности, затем наполняется антифрикционными или клеевыми составами [15]. Интересный результат получается при предварительной пропитке древесины минеральными маслами. После модификации древесина помимо увеличения прочности приобретает свойства самосмазывающегося антифрикционного материала.

Основной областью применения термомеханической модифицированной древесины является изготовление деталей трения машин и механизмов, включая изготовление деталей подшипников скольжения и качения.

Основной недостаток материала – нестабильность его структуры и геометрических размеров в условиях эксплуатации с переменным температурно-влажностным режимом. В настоящее время производство такой древесины ограничено и соответственно ассортимент выпускаемой продукции тоже ограничен.

Химико-механическая модификация проводится прессованием с предварительной или одновременной пластификацией аммиаком или мочевиной, пропиткой смолой или смазочными материалами с последующей термообработкой [15].

Наибольшее распространение метод получил в Латвии под руководством Г. В. Берзиньша и К. А. Роценса. Модифицированная древесина, получаемая по этому способу, обладает повышенной по сравнению с прессованной древесиной формостабильностью и имеет товарный знак «лигнамон». Разработанная технология «лигнамона» автоклавным методом нашла применение в Словакии, где данный материал применяется для производства моделей литья и товаров народного потребления. Помимо использования мочевины как пластифицирующего вещества под руководством К. П. Швалбе [17] разработана технология модификации древесины ацелированием.

Химическое модифицирование древесины – модифицирование химической обработкой аммиаком, уксусным ангидридом или катонами, изменяющими тонкую структуру клеточных стенок и химический состав древесины [15].

Таким образом, модифицированная древесина в сравнении с обычной обладает более высокими физико-механическими характери-

ками. Процесс прессования значительно повышает ее несущую способность, однако область применения такого материала ограничивается постоянством температурно-влажностного режима. Пропитка полимерными составами с дальнейшим их отверждением значительно повышает формостабильность элементов деревянных конструкций, увеличивает их прочность и жесткость, снижает анизотропию свойств и влияние пороков, улучшает гидрофобность и т. д.

1.3. Характеристика и область применения полимерных материалов

В советское время началось исследование улучшения свойств древесины с использованием полимеров. В этот период были разработаны и активно внедрились различные типы полимеров и мономеров, такие как фенолоальдегидные, резорциноформальдегидные, мочевиноформальдегидные, меламиноформальдегидные, кремнийорганические, фурановые, ненасыщенные полиэфирные и дисперсии полимеров.

В настоящее время в промышленности широко используются следующие типы клеев: меламиноформальдегидные, резорциноформальдегидные, фенолорезорциноформальдегидные, мочевиномеламиноформальдегидные, полиуретановые, поливинилацетатные, дисперсии полимеров, эмульсионные с изоционатным отвердителем и эпоксидные клеи.

Фенолоформальдегидные смолы. Смолы, используемые для стекловолокна, объединяют необходимые свойства, такие как термостойкость, высокая механическая прочность и хорошая адгезия к стекловолокну и целлюлозосодержащим материалам (например, древесине и бумаге). При отверждении фенолоформальдегидные смолы выделяют летучие вещества и воду, которые из-за высокой скорости отверждения не полностью удаляются из смолы, что приводит к образованию пузырей, трещин и рыхлых поверхностей на изготовленных изделиях. Для предотвращения этого эффекта при формовании изделий из стекловолокна применяется относительно высокое давление, превышающее давление, создаваемое летучими веществами. Следует отметить, что формальдегидные смолы считаются токсичными [9].

Высокую эксплуатационную надежность имеют клееные конструкции, изготовленные с применением клеев на основе **резорциновых** смол. Такие клеи обладают высокой эксплуатационной надежностью в клееных конструкциях и широко применяются в отечественной практике на протяжении многих десятилетий. Примерами таких клеев являются резорциновый клей ФР-12 и фенолорезорциновый клей ФРФ-50. Особенно известен клей ФРФ-50, который представляет собой продукт конденсации фенолоспиртов с резорцином в водной среде с использованием этиленгликоля в качестве пластификатора. Токсичность резорциновых клеев проявляется в процессе их отверждения и связана с выделением из отвердителя свободного формальдегида [9,12].

Известен новый отечественный клей описанного типа, разработанный в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко и НПП «ОгузХим» (А. А. Мехтиев) – фенолорезорциновый (ФРФ) клей формамол. Клей формамол представляет собой продукт сополиконденсации резорцина с формальдегидом (формамол 1512) или резорцина и фенола с формальдегидом (формамол 1514 и 1516). В качестве отвердителя используется параформальдегид как в твердом виде (клеи формамол 1512 и 1514), так и в растворе (клей формамол 1516) [9] (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Свойства клеев на основе смол формамол

Физико-химические свойства	Виды марок		
	1512	1514	1516
Внешний вид смолы	Однородная жидкость коричневого цвета		
Массовая доля нелетучих веществ, % не менее	60	65	55
Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246, с	40 – 80 (4 мм)	25 – 75 (4 мм)	50 – 150 (6 мм)
Водородный показатель, рН	8±0,5	8±0,5	8±0,5
Предел прочности клеевого соединения древесины при скалывании вдоль волокон (сосна, ель) не менее сухих образцов после кипячения в воде в течение 3 ч, МПа	6,5 3,5	6,5 3,2	6,5 3,2

Мочевиноформальдегидные смолы. Мочевиноформальдегидные смолы растворимы в воде, но не растворяются в обычных органических растворителях. Будучи отвержденными, они практически ни в чем не растворимы.

Карбамидные смолы бесцветны, обладают достаточно высокой теплостойкостью и светостойкостью. Они широко используются как связующее в пресс-порошках, применяемых для изготовления строительных деталей, в качестве клеев для соединения и пропитки тканей и т. п. Однако недостаточная стойкость к действию циклических температурно-влажностных факторов ограничивает применение карбамидных смол. В качестве отвердителей карбамидных смол в основном применяют хлористый аммоний (при ускоренном склеивании) и щавелевую кислоту (при склеивании в нормальных условиях).

В настоящее время широко апробирован на практике двухкомпонентный мочевиномеламиновый (аминоальдегидный) клей марки формамин 1202 (прежнее название аналогичного клея Декон 35), разработанный ЦНИИСК и НПП «ОгузХим», автор А. А. Мехтиев.

Меламиноформальдегидные смолы. Исходным сырьем для меламиноформальдегидных полимеров служат меламин и формальдегид. Для их отверждения при нормальной температуре требуется введение кислых ускорителей отверждения. Меламиноформальдегидные полимеры более водостойки, светостойки, не разрушаются при нагревании и химически устойчивы по сравнению с мочевиноформальдегидными полимерами. Жидкие меламиноформальдегидные полимеры хорошо растворимы в воде, но трудно совмещаются с пластификаторами и органическими растворителями. В связи с этим их модифицируют спиртами [9].

В ряде случаев, например для столярно-строительных изделий и конструкций III класса, могут применяться **поливинилацетатные клеи (ПВА).**

Эпоксидные смолы. Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа атомных группировок, соединенных химическими связями в длинные цепи [12]. Эпоксидные полимеры относятся к классу органических соединений. Органическими называют соединения, в состав молекулярной

цепи которых входят атомы углерода, а также могут входить атомы водорода, кислорода, азота, серы и галогенов.

Эпоксидные смолы получают при взаимодействии многоатомных фенолов (дифенолопропан и др.) с веществами, содержащими эпоксидную группу (например, с эпихлоргидрином). После введения отвердителя эпоксидные смолы становятся неплавкими, нерастворимыми продуктами, обладающими сетчатой трехмерной структурой [12]. В качестве отвердителей чаще всего используют ангидриды кислот или полиамины, например, полиэтиленполиамин.

Для склеивания древесины с металлом, как правило, используют только эпоксидные клеи. Вопросы склеивания древесины достаточно изучены и подробно изложены в соответствующей литературе [8, 9]. Поэтому рассмотрим модификацию древесины клеевым составом на основе эпоксидной смолы.

Отвержденные эпоксидные смолы обладают ценными эксплуатационными свойствами и высокими физико-механическими показателями: высокая прочность, нетоксичность, хорошая адгезия к различным материалам, высокая стойкость к действию агрессивных сред и т. п. (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Физико-химические свойства диановых оксиполимеров [9]

Физико-химические свойства	Показатель
Плотность при 20 °С, г/см ³	1,16 – 1,25
Температура стеклования, °С	60 – 180
Теплопроводность, Вт/(мК)	0,17 – 0,19
Удельная теплоемкость, кДЖ/(кг · К)	0,8 – 1,2
Теплостойкость по Матерсону, °С	55 – 170
Прочность, МПа: – при растяжении; – сжатии; – изгибе	40 – 90 100 – 200 80 – 140
Модуль упругости, МПа	2500 – 3500
Относительное удлинение, %	0,5 – 6
Ударная вязкость, кДЖ/м ²	5 – 25
Водопоглощение за 24 ч, %	0,001 – 0,1

Эпоксидные смолы в отличие от многих других полимерных материалов отверждаются с минимальной усадкой без выделения побочных продуктов. Эти смолы используются в качестве покрытий с хорошей атмосферостойкостью и светостойкостью, в качестве клеев, герметиков, коррозионно-стойких и водостойких покрытий, для изготовления различных технических устройств, в качестве связующих при производстве стекловолокна и пресс-композиций. Самой популярной является диановая смола. Ее доля в общем объеме производства составляет более 90 %. Было разработано свыше 1000 марок отвердителей для эпоксидной смолы [12].

Однако не рекомендуется использовать составы, содержащие только эпоксидную смолу и отвердитель, так как в большинстве случаев получаются весьма жесткие материалы, подверженные трещинообразованию. Кроме того, к отрицательным характеристикам можно отнести малоэластичность и высокую вязкость [17]. Для придания полимеру комплекса нужных свойств применяют различные способы модификации эпоксидной смолы. Методы модификации делятся на три группы: химические, физические и физико-химические. Также применяется комбинация этих методов.

Решая поставленные задачи, остановимся на физико-химической модификации, которая основывается на методах введения твердых нерастворимых наполнителей, поверхностно-активных веществ (ПАВ), инертных пластификаторов и разбавителей, стабилизаторов, лигирующих добавок.

1.4. Армирующие композиционные материалы на основе искусственных волокон, тканей и лент

Первые упоминания о создании и широком применении композиционных материалов относятся к концу 30-х годов XX века, когда основными областями их применения были авиационная и электротехническая промышленность. В 1939 – 1940 гг. на базе ФГУПВИАМ в Советском Союзе М. С. Аслановой и М. Г. Черняком были проведены работы по созданию композиционных материалов. Параллельно с разработкой и отладкой технологии производства проводились работы по

получению древесно-слоистых пластиков (дельта-древесины) и исследованию свойств непрерывных стеклянных нитей и тканей. Появление новых материалов стало ответом на вызовы времени: низкие темпы обновления технического оборудования и дефицит алюминия для авиационной промышленности.

Первые свидетельства применения композитов в США относятся к 1943 году. Опытно-конструкторские работы и научные изыскания по армированным стеклянными волокнами пластикам были реализованы на Райт-Патерсоновской военно-воздушной базе в г. Дейтон, штат Огайо. Детали задней части фюзеляжа самолета «Вальти ВТ-15» изготавливалась из бальзового дерева, облицованного пятью слоями стеклоткани толщиной 0,76 мм, пропитанной полиэфирным связующим (массовая доля 42 – 45 %) [17].

В настоящее время композиционными материалами (КМ), или композитами, называют материалы, состоящие из двух и более компонентов и обладающие специфическими свойствами, отличными от суммарных свойств составляющих их компонентов. Компоненты не должны растворяться или иным способом поглощать друг друга [15].

На микроуровне композиционные материалы состоят из двух или более различных компонентов. Первый компонент – непрерывная фаза – называется матрицей, а второй компонент – наполнителем, или армирующей фазой, роль которой заключается в изменении свойств матрицы в практически желаемом направлении. В зависимости от назначения КМ может иметь керамическую, металлическую или полимерную матрицу. Полимерные матрицы имеют относительно низкие прочность и модуль упругости, в то время как керамические матрицы обладают высокой прочностью и жесткостью, но очень хрупки. Для уменьшения хрупкости в композиты вводят специальные пластификаторы.

Вид наполнителя, его форма и размеры оказывают значительное влияние на физико-механические характеристики композитов. Выделяют два типа наполнителя: волокна (фибру) и частицы. Классификация композитов в зависимости от вида наполнителя представлена на рис. 1.2 [17].

В наполненных КМ частицы имеют приблизительно равные размеры во всех трех направлениях. Распределение частиц – случайное.

Волокна характеризуются длиной, которая, как правило, намного превышает их диаметр, причем отношение длины к диаметру может сильно варьироваться. В случае, когда волокна уложены в одном направлении, композит называют однонаправленным, если в качестве наполнителя используют ткани – двуосноармированным. Другим классом армированных композиционных материалов являются многослойные композиты, которые разделяют на ламинаты и гибриды.

Ламинаты состоят из нескольких однонаправленных слоев, уложенных в различных направлениях и имеющих определенную последовательность укладки. Обычно ламинат содержит от 4 до 40 слоев, ориентация волокон в которых определенным образом меняется по толщине. Во многих случаях древесину и другие материалы можно комбинировать по-разному, образуя искусственные композиционные материалы с превосходными характеристиками.

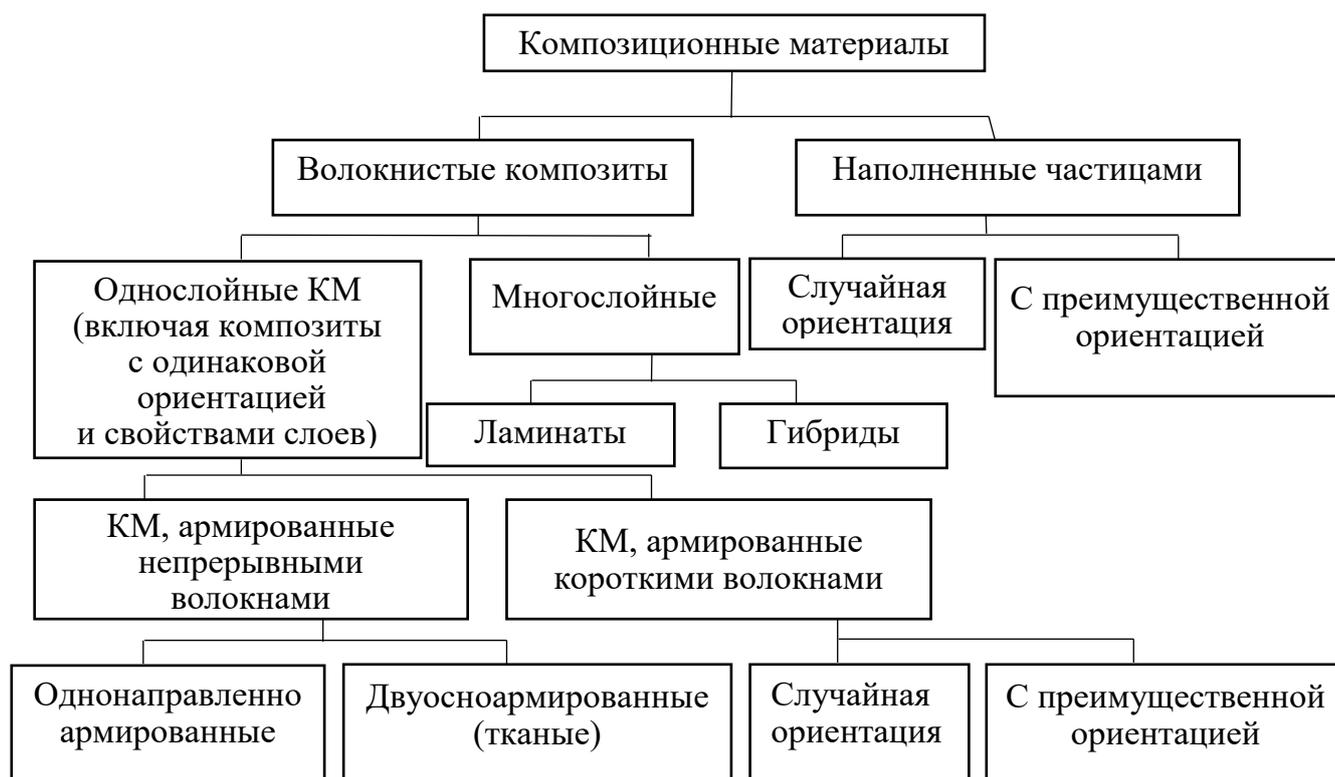


Рис. 1.2. Классификация композиционных материалов в зависимости от типа наполнителя

Например, смесь углеродных и стеклянных волокон позволяет создать недорогой композит, обладающий повышенной жесткостью ввиду высоких механических характеристик углеродных волокон и малой стоимости стекловолокна [9].

Гибридами называют композиты, армированные волокнами путем чередования слоев на основе различных волокон. Смешение различных волокон может производиться как на одном уровне, так и путем чередования слоев на основе различных волокон. Общий вид гибридных тканей представлен на рис. 1.3. В качестве исходного сырья применяют материалы, обладающие высокими физико-механическими характеристиками. К ним относят бор, углерод, кремний, арамид, оксиды алюминия и циркония и др.

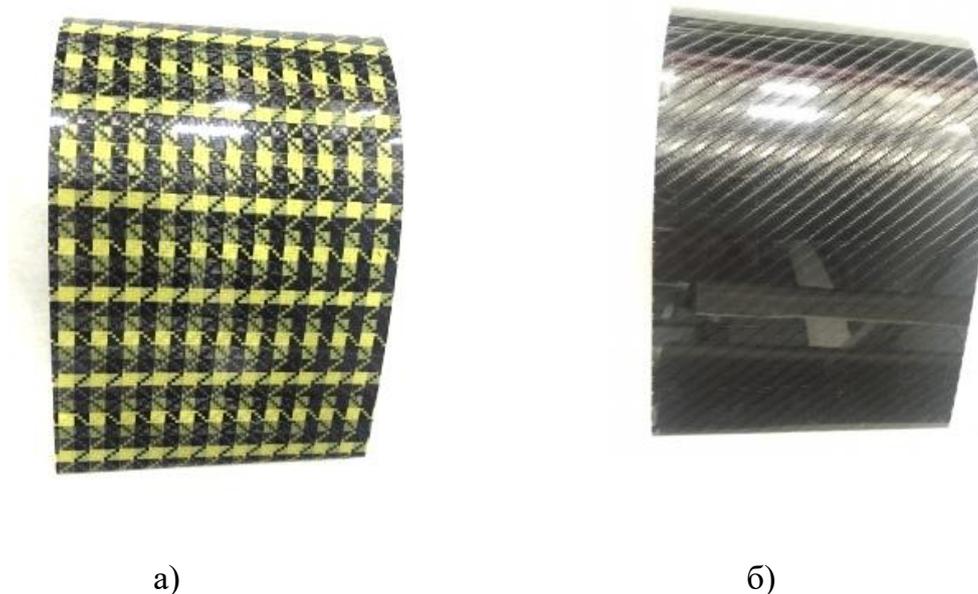


Рис. 1.3. Общий вид гибридных тканей на основе углеродных и арамидных волокон (а); углеродных и стекловолокон (б)

Область применения определяется набором получаемых параметров КМ, ценой исходного сырья, эксплуатационными технологическими параметрами. В табл. 1.3 представлены физико-механические характеристики некоторых наполнителей [9; 10].

Таблица 1.3

Сравнение свойств наполнителей металлических и неметаллических армирующих материалов

Наполнитель	Плотность ρ , т/м ³	Предел прочности σ_B , МПа	Удельная прочность σ_B / ρ , МПа/(т/м ³)	Модуль упругости E , ГПа	Удельный модуль упругости E / ρ , ГПа/(т/м ³)
Алюминий	2,687	62	23,00	73	27,16
Окись алюминия	3,989	689	172,72	323	80,97
Окись бериллия	3,020	517	171,19	352	110
Бор (сердечник борид вольфрама)	2,521	3450	1368	441	174,93
Сталь	7,850	4130	526,11	210	26,75
Стекло тип S	2,493	4820	1933	85	34
Стекло тип E	2,548	3450	1354	72	28,26
Арамид	1,440	3600	2500	130	90,27
Углерод	1,413	4900	3467	200	141,54
Эпоксид	1,120	50	44,64	4	3,57
Меламиноформальдегид	1,500	70	46,66	9	6

При создании композитов в качестве наполнителя используются волокна и частицы, а не целые их блоки. Это связано с тем, что на микроуровне материалы приобретают механические свойства иного порядка, чем на макроуровне. Разрушение однородно нагруженного тела начинается у самого крупного дефекта. Следовательно, чем меньше размер образца, тем меньше размер возможных дефектов и выше прочностные показатели. Например, прочность на растяжение углерода в волокнах составляет 3100 МПа, а в блоке – 20 МПа, модуль Юнга в волокнах – 290 ГПа, в блоке – 10 ГПа [15]. Очевидно, ввиду малого диаметра элементарных волокон их прямое применение в конструкциях невозможно. По этой причине из элементарных непрерывных нитей методом скручивания формируют ровинги (жгуты), которые в дальнейшем могут использоваться как в виде самостоятельного элемента, так и для производства тканых материалов.

Поскольку механические повреждения волокон оказывают существенное влияние на прочностные свойства волокнистых материалов, использование непрерывной матрицы в композитах помимо перераспределения усилий между волокнами защищает их от механических повреждений и упрощает технологию изготовления изделий. Объемная доля наполнителя в этом случае ограничена рядом факторов. В обычных условиях из-за технических сложностей и хрупкости материала количество наполнителя в композите не превышает 65 – 70 % по объему материала. Однако современные методы позволяют получать композиты с более высоким содержанием армирования. В случае однонаправленных стеклопластиков верхний предел армирования установлен на уровне 85 % по объему. Композиты на основе арамидных и полиэтиленовых волокон, содержащие до 98 % армирования, были получены при использовании органических волокон, сечение которых может быть изменено в процессе поперечного прессования при высоких температурах [12].

В 1964 году в США Б. Розеном был опубликован цикл работ по механике разрушений композитов на основе стеклянного волокна и полимерной матрицы. Автор предположил, что стеклянные волокна обладают статистическим распределением трещин или дефектов, приводящих к разрушению волокна под напряжением еще до разрушения композита. Он доказал, что существование разрывов в композиционном материале является причиной его разрушения. Наличие разрывов в волокнах (вследствие их неравнопрочности) приводит к возникновению локальных сдвиговых напряжений в матрице, которые, согласно его предположениям, релаксируют вследствие вязкоупругой работы матрицы. В результате все более длинные части волокон около разорванных концов не могут нести нагрузку. Такая последовательность разрывов, следующих один за другим, приводит к мысли о существовании временной зависимости процесса разрушения волокнистых композитов даже для однонаправленных, нагруженных в направлении волокна.

Учет убывающей функции прочности волокна, а также введение системы коэффициентов, отражающих величину концентрации напряжений, позволили получить достаточно высокую сходимость теоретических данных с результатами эксперимента, что было подтверждено дальнейшими исследованиями в данной области.

К настоящему моменту реологические свойства композиционных материалов изучены в достаточной степени, причем результаты теоретических материалов с высокой точностью подтверждены экспериментальными данными. Современные исследования базируются на теории

матричных уравнений слоистых пластин, вязкоупругого характера деформирования композита и наследственного накопления повреждений при многократном знакопеременном нагружении во времени.

Важнейшей характеристикой, определяющей реологические свойства композитов, является выбор матрицы и наполнителя. Материалы с высоким модулем упругости волокна обладают меньшей ползучестью. Функцией матрицы, как отмечалось ранее, остается передача усилий между волокнами, поэтому она должна обладать низкой вязкостью и хорошей смачиваемостью поверхности наполнителя, способностью образовывать сплошную среду без микропор и трещин, что, в свою очередь, ведет к уменьшению концентрации напряжений в композите.

Эффективность применения тех или иных композиционных материалов заключается в таких показателях, как удельный модуль упругости и удельная прочность. Они определяются как отношение соответственно модуля Юнга и временной прочности композита к единице массы. Более высокий показатель удельного модуля упругости и удельной прочности означает, что при использовании данного материала вес конструкции может быть уменьшен при прочих равных показателях. Данный аспект становится особенно важным как для космической и авиационной техники, так и в строительной отрасли при проектировании элементов усиления для конструкций из железобетона, металла и древесины. На рис. 1.4 показана диаграмма, характеризующая удельный модуль упругости и удельную прочность различных волокон.

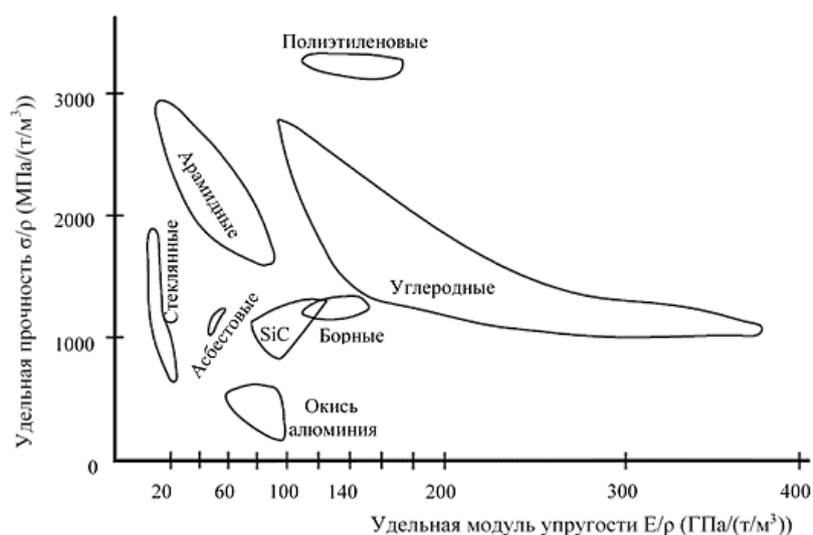


Рис. 1.4. Диаграмма, характеризующая удельную прочность и удельный модуль упругости для искусственных волоконистых наполнителей (асбест приведен для сравнения) [6]

Диаграмма наглядно демонстрирует области распределения значений, приходящихся на тот или иной материал наполнителя. По совокупности представленных параметров можно сделать вывод, что применение углеволокна в качестве наполнителя отвечает требованиям по высокой прочности, жесткости и легкости получаемого из них композита, однако недостатком является его высокая стоимость.

Стекловолокно, в свою очередь, служит более дешевой его заменой, однако высокая ползучесть материала накладывает определенные ограничения на область его применения.

Прямое влияние на механические характеристики композитов оказывает технологический процесс их получения. Выделяют следующие способы формования композиционных материалов: контактный, метод вакуумной инфузии, RTM (resin transfer molding), или метод инъекции, пултрузия, автоклавное формование.

1.5. Виды древокомпозитных материалов

Современное использование древесины в качестве строительного материала в основном сосредоточено на неконструкционных применениях, часто оправданных ее эстетическими преимуществами, несмотря на такие физические свойства, как легкий вес и высокое соотношение прочности и веса. Тем не менее древесина широко используется в качестве несущего материала в малоэтажных строительных конструкциях в некоторых частях Азии, в Северной Америке и в финно-скандинавских европейских странах.

Родоначальником клееной древесины считается немецкий плотник Карл Фридрих Отто Хетцер (1906 г.). Клееный брус – это материал из древесины, изготовленный с помощью склеивания между собой в брус сращенных по длине бездефектных досок (рис. 1.5).

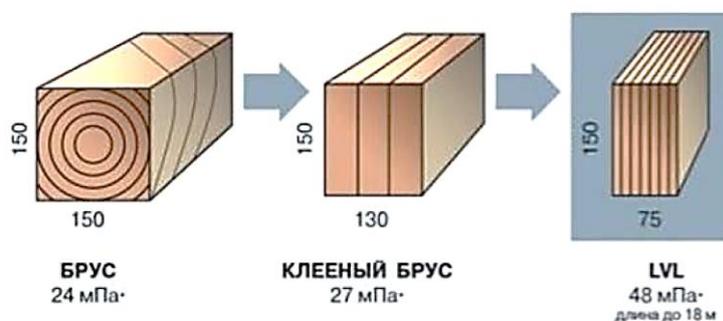


Рис. 1.5. История клееного бруса

В 1935 году в Северной Америке изобрели брус из шпона LVL (Laminated Veneer Lumber). LVL – конструкционный материал, изготовленный по технологии склейки нескольких слоев лущеного шпона хвойных пород (сосна, ель, лиственница) толщиной порядка 3 мм. Брус из шпона является одним из типов клееных деревянных конструкций.

В Европе проблему подверженности дерева атмосферному воздействию решили в 1950-х годах с началом развития химической промышленности. Новые синтетические клеевые составы повысили прочностные и теплоизоляционные качества дерева. Слои досок склеивали таким образом, чтобы направления древесных волокон чередовались. Улучшились звукоизоляционные свойства материала и устойчивость к нагрузкам. В качестве сырья использовали сосну, ель и лиственницу.

В Германии совершенствовали методы шипового сращивания и удаления пороков древесины. Выпускались новые станки для различных работ по обработке древесины.

В 1960-х годах в Финляндии братья Саарелайнен наладили технологию индустриального производства клееного бруса для малоэтажного домостроения.

В 1996 году в Лозанне (Швейцария) началось развитие производства CLT (Cross laminated timber) панелей. CLT-плита изготовлена из массива дерева и состоит минимально из трех щитов клееной древесины, расположенных перпендикулярно друг к другу (рис. 1.6).

Композиционные материалы широко используются в строительстве и машиностроении из-за их хорошей коррозионной стойкости, низкой стоимости, легкости получения и обработки.

Так как при изготовлении клееной древесины избавляются от ее дефектов, это крайне положительно сказывается на ее механических свойствах. Для возведения многоэтажных домов используются высокопрочные композитные материалы на основе древесины, в частности – LVL-брус и CLT-панели. Первый из них применяется в качестве вертикальных и горизонтальных элементов несущего каркаса здания. Материал представляет собой многослойный шпон из дерева хвойных пород. Волокна слоев располагаются параллельно, толщина каждого слоя составляет около 3 мм.

Безопорный пролет балок из LVL-бруса может достигать 36 м, а ферм – 42 м и более. Брус не дает усадки и остается геометрически стабильным на протяжении всего срока службы. В отличие от обычного дерева LVL не подвержен воздействию микроорганизмов, не деформи-

руется от сырости, устойчив к химической агрессии. Современные технологии изготовления позволяют добиться высокой степени готовности строительных конструкций, а сборка деревянного каркаса на площадке выполняется по аналогии с монтажом быстровозводимых зданий из стали.

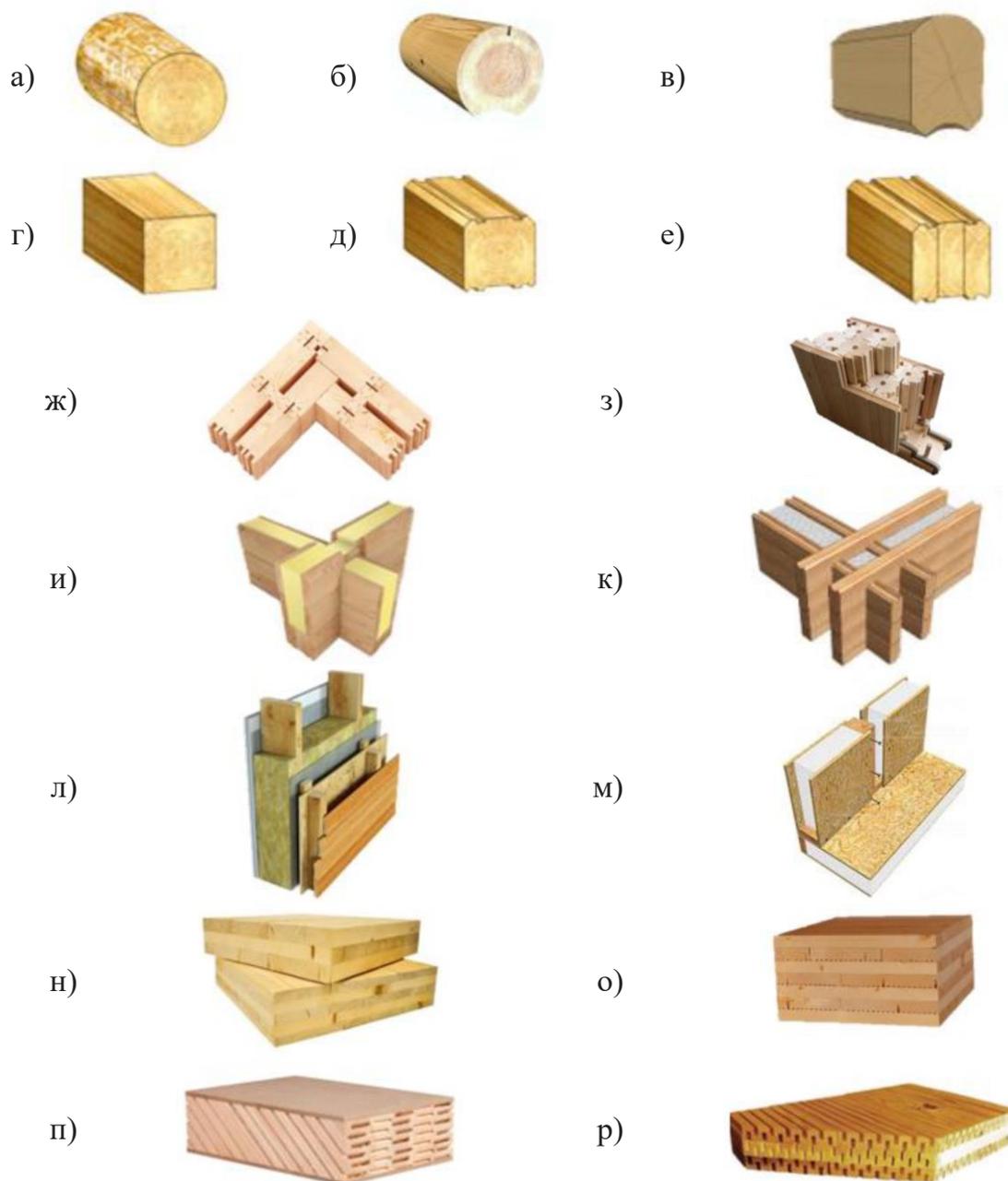


Рис. 1.6. Основные виды материалов на основе древесины: а – бревно ручной рубки; б – бревно оцилиндрованное; в – двухкантный брус (лафет); г – брус; д – брус профилированный; е – брус клееный профилированный; ж – брус вертикальный Twin Beam; з – брус вертикальный Naturi; и – термобрус; к – двойной брус; л – деревянный каркас; м – SIP-панель; н – панель CLT; о – панель МНМ; п – панель DendroLight; р – панель «Унипанель»

CLT-плиты и панели – композиционный материал, изготавливаемый методом перекрестного склеивания слоев древесины. Применяется в качестве ограждающих конструкций, плит перекрытия и покрытия зданий. Конструкции CLT отличаются легкостью, пожаробезопасностью, высокими показателями прочности, тепло- и звукоизоляции. В настоящее время выпускаются CLT-плиты толщиной от 60 до 400 мм.

Материалы CLT и LVL могут комбинироваться друг с другом. Например, каркас здания может состоять из LVL-бруса, а стены и перекрытия – из панелей CLT. Существуют также гибридные варианты строительства, когда основные элементы каркаса монтируются из железобетона, а ограждающие конструкции и второстепенные балки – из композиционной древесины. Причинами такого подхода могут являться в том числе слишком жесткие (и не всегда обоснованные) требования пожарной безопасности.

Вопросы для самопроверки

1. В чем отличия CLT и LVL?
2. Какова область применения клееных деревянных конструкций?
3. Перечислите виды древокомпозитных материалов.
4. В чем преимущества древесины перед бетоном и металлом?
5. Какие наполнители используются при создании композитов?
6. В чем преимущества и недостатки древокомпозитных конструкций?
7. Какие клеи используются при создании древокомпозитов?
8. Перечислите реологические свойства древесины и древокомпозитов.
9. Приведите классификацию композиционных материалов в зависимости от типа наполнителя.
10. Что такое модификация древесины?
11. Какие способы модификации древесины вам известны?
12. Перечислите свойства модифицированной древесины.
13. Какие клеи используются для модификации древесины?
14. Назовите армирующие волокна для древесины: преимущества и недостатки.
15. Раскройте понятие анизотропии древесины.

Глава 2. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЯХ

2.1. История многоэтажного деревянного домостроения

Дерево – один из старейших строительных материалов, но опасения по поводу его горючести привели к его широкой замене негорючими элементами. Обычные несущие строительные материалы, используемые для переноса веса здания на землю (например, стены, колонны, балки), включают комбинацию стали, кирпича и бетона. До второй половины прошлого века высотные деревянные здания оставались экзотикой, архитектурными экспериментами. Первые многоэтажные здания с применением несущих деревянных конструкций были возведены в США. Дом «Батлер» построен в 1906 году с несущими деревянными конструкциями, в качестве заполнения выбран кирпич (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Дом «Батлер», США

Самое высокое здание в мире (153,8 м), построенное в 2004 году с использованием дерева, находится в Китае (рис. 2.2). Самая первая пагода на этом месте была построена в XII веке, но до настоящего времени не сохранилась. Конструкция пагоды насчитывает 13 ярусов. В ней применены металлодеревянные несущие конструкции.



Рис. 2.2. Пагода Тяньнин, Китай

Современная история высотного деревянного домостроения началась в 70-х годах прошлого века, когда в Германии был разработан и запатентован новый материал – панели CLT (Cross-Laminated Timber). Они состоят из деревянных ламелей, сложенных в плиту перпендикулярно друг другу в несколько слоев (обычно от пяти до восьми) и склеенных под высоким давлением специальным составом. Изначально новинка применялась только в кровельных системах, позднее ее использование расширилось. Первые дома из CLT-панелей были построены в середине 90-х годов прошлого века в Швейцарии, Германии и Австрии.

О массовом высотном деревянном домостроении заговорили в начале нынешнего века в связи с увеличивающимся интересом к проблемам экологии [19].

Строительство высотных жилых домов и бизнес-центров из дерева – тенденция, набирающая все большую популярность в странах Европы и Америки. Технологии деревянного строительства постоянно совершенствуются, и уже становится очевидным тот факт, что строить из дерева – это выгодно, быстро, надежно и безопасно. С каждым годом появляются все новые рекорды возведения многоэтажных зданий с применением деревянных панелей CLT и клееного бруса LVL.

Преимущества деревянного строительства

Дерево – это возобновляемый природный ресурс, из которого изготавливают современные композитные материалы, отличающиеся высокой прочностью и долговечностью. При этом для производства высокотехнологичных стройматериалов, в частности панелей и бруса, может использоваться низкосортная древесина, щепка и отходы. Производство и обработка строительных конструкций из древесины, равно как их транспортировка и монтаж, обходятся дешевле в сравнении со стальными и железобетонными аналогами [20].

Работа с деревом менее энерго- и трудоемка за счет применения простых инструментов и оборудования, кранов меньшей грузоподъемности. При этом монтаж деревянных конструкций отличается высокой технологичностью и скоростью, так как используются блоки и модули заводской сборки.

Здания из дерева отвечают современным нормам «зеленого» энергоэффективного строительства. Они могут возводиться на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями, в том числе – с сейсмической активностью, наличием горных подработок и свойств просадочности.

Испытания [18; 19] доказали способность высотных зданий из дерева противостоять сейсмическим нагрузкам. Под воздействием сейсмических толчков конструкции из дерева пластически деформируются без разрушения.

Проведенные огневые испытания подтверждают, что древесина показывает наилучшие результаты в области пожарной безопасности по сравнению со сталью. Прочностные характеристики и устойчивость строительных конструкций из дерева сохраняются в течение 45 мин после начала пожара, в то время как предел огнестойкости металлов вне защищенных условий составляет 15 мин. Наружный слой древесины обжигается при высоких температурах, а внутренний слой продолжает сохранять свои технические характеристики в течение длительного времени. Когда древесина нагревается до температуры 280 °С, на ее поверхности образуется сгоревший слой, который тлеет внутри, затрудняя поступление кислорода внутрь и замедляя процесс горения. Разрушение массива дерева происходит со скоростью примерно 0,5 – 0,8 мм в минуту: за 60 мин из 200 мм бруса выгорит только 30 – 50 мм наружного слоя. Риск воспламенения возникает примерно при температуре 500 °С. Предел огнестойкости зависит от размера и габаритов поперечного сечения: чем больше размеры, тем труднее воспламенить конструкции, тем медленнее процесс горения.

При той же температуре негорючая, но теплопроводная сталь плавится, деформируясь в разных направлениях уже при температуре 450 – 500 °С и теряя свою несущую способность. Необработанные стальные конструкции с огнезащитным слоем разрушаются через 15 мин после начала пожара, но в отличие от деревянных конструкций, где горение протекает по уже изученной схеме, невозможно точно рассчитать, где произойдет обрушение. Основными преимуществами деревянных конструкций в случае пожара являются повышенная огнестойкость и предсказуемость поведения. Для предотвращения возгорания деревянных зданий проводится заводская обработка конструкций антипиренами, устанавливаются системы оповещения и спринклерные установки для нейтрализации источника.

Одной из особенностей монтажа деревянных конструкций следует назвать удачное техническое решение по монтажу крепежных элементов, которое обеспечивает высокую точность (10 мм) по сравнению с монтажом железнодорожных конструкций (2 мм). Учитывая не-

большой вес конструкции и упрощение монтажных работ, не требующих специальных механизмов и оборудования, необходимо обратить внимание на достижение высокой производительности труда и обеспечение безопасности работ. Скорость монтажа деревянных конструкций выше, чем при любом другом типе строительства за счет технической возможности транспортировки готовых блоков и модулей к рабочему месту. Новейшее оборудование позволяет изготавливать панели CLT длиной до 24 м и шириной до 3,5 м, а ограждающая конструкция всего этажа здания может быть установлена за один шаг.

По своим техническим характеристикам деревянные конструкции сравнимы с бетоном и кирпичом, которые широко используются сегодня. Дерево не только пропускает воздух, но и действует как естественный фильтр. Теплопроводность дерева существенно отличается от теплопроводности кирпича, что позволяет значительно уменьшить толщину и вес наружной стены и снизить нагрузку на фундамент. Деревянные здания могут быть построены в районах, подверженных землетрясениям и просадкам грунта. Показатели энергосбережения: дома, построенные из панелей CLT и балок LVL, потребляют 190 кВт на 1 м² в год в отличие от монолитного железобетона (65 кВт). Положительными сторонами деревянных конструкций выступают их функциональные стандарты (надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, точность, прочность); технические стандарты (сложность изготовления, разделение технических объектов на элементы); экономические стандарты (стоимость материалов, энергии, габаритные размеры); антропологические (социальные) стандарты (эргономика, красота, безопасность, экологические соображения). При всех противоречиях этих стандартов можно сделать вывод, что современные деревянные конструкции занимают достойное место [6].

К недостаткам многоэтажных деревокомпозитных зданий можно отнести более низкую влагостойкость по сравнению с бетоном и металлом; низкую звукоизоляцию; психологическую неготовность широких масс населения к жизни в многоэтажном деревянном доме; высокую стоимость строительства.

2.2. Деревянное многоэтажное строительство за рубежом

Росту строительства деревянных многоэтажных зданий способствовали изменения в строительных нормах в 2011 году, которые разрешили использовать древесину в зданиях высотой до 8 этажей. На сегодняшний день в Финляндии построено более 50 деревянных многоэтажных домов. Развитие деревянного многоэтажного домостроения связано с неблагоприятной экологической обстановкой, особенно в крупных городах и промышленных центрах Европы [19]. Интенсивное использование строительных деревянных конструкций в многоэтажном строительстве возможно только в случае, когда будут обеспечены, с одной стороны, потребности производства, а с другой – преимущества дерева как конструкционного материала. При этом развитие современных деревянных конструкций, использующих высокотехнологичные строительные материалы, следует понимать как процесс перехода на новый, более качественный уровень. Сейчас активно воплощаются в жизнь идеи строительства высотных домов из древесины, в основном в странах Евросоюза, Канаде, Великобритании, т. е. в странах, обладающих природными ресурсами, мощностями и передовыми технологиями. В Европейском Союзе (ЕС) реализуется программа «Деревянная Европа», цель которой – повышение до 80 % доли жилой недвижимости с применением инновационных конструкций из дерева. Этот проект финансируют государства ЕС. Уже сейчас доля деревянных домов достигает в Финляндии 40 %, в Австрии – 30 %, в Германии – 20 %. Кроме того, разрабатываются современные технологии строительства высотных деревянных домов. В развитых странах многоэтажные дома из дерева уже давно не относятся к разряду экспериментальных. Внушительный перечень реализованных и находящихся в стадии реализации проектов, воплощающих смелые архитектурные идеи, служит лучшим тому подтверждением.

В конце 2015 года в Норвегии в городе Бергене введен в эксплуатацию 14-этажный жилой комплекс Treet Bergen (рис. 2.3). Высота здания составляет 49 м. Сегодня этот комплекс является флагманом

мирового деревянного строительства. Здание возведено из 48 модулей высокой заводской готовности (в них уже были смонтированы инженерные коммуникации и выполнена отделка). Высокое качество сборки и точность подгонки элементов каркаса и стеновых ограждений обеспечили практически нулевое отклонение конструкций по вертикали (не более 3 мм). Основа деревянной высотки выполнена из колонн клееного бруса, толщина которого один метр.



Рис. 2.3. Четырнадцатизэтажный жилой дом в Норвегии

Расчет каркаса здания выявил своеобразный недостаток модифицированной древесины, заключающийся в ее легкости. Для увеличения устойчивости и сопротивляемости ветровым нагрузкам в конструкцию здания дополнительно были включены железобетонные плиты, разделяющие группы модулей на несколько секторов. Всего в доме 62 жилые квартиры, в том числе одно-, двух- и трехкомнатные.

В Канаде построено общежитие в Ванкувере, рассчитанное на проживание 400 студентов (рис. 2.4). Прямоугольное в плане здание

решено в LVL-каркасе с перекрытиями и ограждающими конструкциями из панелей CLT. Жесткость соединений деревянных колонн и балок обеспечивается наличием стальных коннекторов. Здание высотой 53 м разделено на несколько ядер железобетонными плитами, увеличивающими вес всей конструкции и придающими ей дополнительную жесткость [20].



Рис. 2.4. Семнадцатизэтажное студенческое общежитие в Ванкувере, Канада

Несколько лет назад в Мельбурне из композитных CLT-блоков было возведено десятиэтажное здание «Forté» (рис. 2.5). Жилой дом запроектирован и построен с учетом требований самых современных «зеленых» норм, в том числе смонтирована система сбора и очистки дождевой воды, установлены тепловые насосы, энергосберегающее светодиодное освещение. Здание прошло сертификацию по международной программе Green Star и удостоилось высшей оценки «5 звезд».



Рис. 2.5. Десятиэтажный жилой дом в Австралии

Другим высотным деревянным жилым зданием считается комплекс «НоНо» в Вене – в нем 24 этажа общей площадью 17 000 м² (рис. 2.6). При строительстве использовано порядка 6 000 м³ панелей.



Рис. 2.6. Двадцатичетырехэтажный жилой дом в Австрии

Восемнадцатизэтажный жилой комплекс высотой 85 м построен в 2019 году в норвежском городе Брумунддале (рис. 2.7). Международный совет по высотным зданиям и среде обитания (CTBUH) объявил его самым высоким деревянным зданием в мире. Общая площадь строения – 11,3 тыс. м². Помимо апартаментов комплекс включает отель, ресторан и бассейн.



Рис. 2.7. Восемнадцатизэтажный жилой комплекс в Норвегии

Многоэтажное строительство с деревянным каркасом переживает период растущей популярности, при этом «деревянные башни» и «деревянные небоскребы» считаются потенциальными изменениями в строительной практике.

2.3. Опыт высотного деревянного домостроения в России

Россия обладает самыми богатыми запасами леса. При грамотной организации выращивания и промышленного использования древесины ее запасы для России неисчерпаемы. Учитывая внедрение новых технологий деревообработки, стоимость таких строительных материалов может постепенно снижаться, а цены на производство бетона и стали постоянно растут.

Сегодня строительство из бруса в нашей стране регулируется нормативными актами более чем полувековой давности. Прежде всего, это касается правил пожарной безопасности, которые не учитывают характеристики современных композиционных материалов CLT и LVL. Таким образом, в соответствии с установленным порядком возможно проектирование и строительство деревянных зданий высотой не более 5 м и площадью до 500 м².

Многоэтажное строительство в России относится к категории уникальных и экспериментальных, тем не менее оно существует. В целях соответствия действующим стандартам, если монолитный каркас

покрыт панелями CLT, при возведении здания используется комбинированная технология железобетонного и деревянного строительства. Согласно такой схеме в Пушкинском районе Санкт-Петербурга реализуется проект пятиэтажного здания. В Вологде и Нижнем Новгороде есть примеры пилотных проектов.

К сожалению, при отсутствии соответствующей нормативной базы [3; 4; 5] многоэтажное строительство из дерева в России не выгодно. Для каждого проекта приходится получать множество согласований и заключений, заново проводить испытания материалов, составлять обоснования, решать вопросы с местными властями, различными ведомствами и органами надзора. Не существует стандартного пути получения разрешительной документации на строительство деревянных многоэтажных зданий.

В то же время в развитии технологий деревянного строительства заинтересованы все: производители строительных материалов, строительной химии (клеи, пропитки и добавки, краски), проектные и подрядные организации.



Рис. 2.8. Дом Сутягина в Архангельске

Первый жилой многоэтажный деревянным дом в России – дом Сутягина в Архангельске (рис. 2.8). Тринадцатиэтажный самострой возведен в начале 90-х годов прошлого века без согласованного проекта и каких-либо противопожарных мероприятий и позднее был снесен по решению суда.

В настоящее время ведется строительство жилого комплекса, включающего два четырехэтажных дома в Вологодской области (г. Сокол).

В комплексе 64 одно- и двухкомнатные квартиры (рис. 2.9). Проект разработан компанией Segezha Group – это пока единственный в нашей стране производитель CLT-панелей. Что касается цен на будущие квартиры, то они обещают быть вполне приемлемыми – на 15 – 20 % дешевле, чем в малоэтажном кирпичном доме, но примерно на столько же дороже, чем в железобетонной «высотке».



Рис. 2.9. Четырехэтажный жилой дом в г. Сокол

Станут ли подобные проекты массовыми, сказать пока сложно. Во-первых, помимо отработки технологии и наращивании объемов производства панелей непонятен вопрос с востребованностью такой недвижимости на рынке жилья. С деревянными домами связано множество опасений – высокая пожароопасность, сложность в содержании из-за возможного гниения и появления плесени и пр. Конечно, в CLT-панелях решены все возможные проблемы – они не горят и не поддерживают горение, не подвержены коррозии и гниению, им не страшны

вредящие древесине насекомые, используемый клей не содержит токсичных веществ, но сложившиеся стереотипы достаточно устойчивы и на их преодоление может потребоваться немало времени [20].

Таким образом, необходимо синхронизированное решение двух проблем: разработка нормативной базы и строительство хотя бы одного пилотного проекта с демонстрацией возможностей новых строительных материалов, например, таких как CLT-панели. Надо показать современные материалы в деле: узлы и соединения, пожаростойкость, сейсмоустойчивость, методики расчета экономической эффективности и варианты типовых проектов зданий. Современная технология, позволяющая возводить многоэтажные дома с применением древесины, в Европе отражена в 19 нормативных документах, а у нас пока только в одном, который только описывает технологию.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы предпосылки и причины перехода к многоэтажному деревянному домостроению?
2. В чем преимущества и недостатки многоэтажного деревянного домостроения?
3. Расскажите об опыте проектирования и строительства многоэтажного деревянного домостроения в Европе.
4. Опыт проектирования и строительства многоэтажного деревянного домостроения в России.
5. Почему в России не развито многоэтажное деревянное домостроение?
6. Охарактеризуйте сейсмостойкость деревокомпозитных многоэтажных зданий?
7. Расскажите об истории развития проектирования многоэтажного деревянного домостроения.
8. Какое первое многоэтажное здание, выполненное с применением несущих деревокомпозитных конструкций, вам известно?
9. Какие современные прогрессивные технологии применяются при строительстве многоэтажных деревокомпозитных зданий?
10. В чем особенности проектирования многоэтажных деревокомпозитных зданий?

Глава 3. РАСЧЕТ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Инженерный метод расчета деревокомпозитных конструкций

Эффективность и долговечность строительных конструкций во многом зависит от применяемых методов расчета прочности, устойчивости и деформативности. Используемые в последнее время численные методы расчета не могут полностью заменить классические инженерные методы расчета конструкций, особенно при расчете по предельным состояниям.

В основе расчета строительных конструкций лежат основные положения теории упругости и в первую очередь гипотеза о сложности строения упругого тела, по которой тело, непрерывное до деформации, остается непрерывным и после деформации.

Согласно действующим строительным правилам (СП) расчет деревянных конструкций (армированные деревянные конструкции (АДК) – это разновидность таких конструкций) ведется в предположении упругой работы древесины. При этом учитывается, что АДК – сложные комплексные конструкции, в которых, особенно при длительной эксплуатации, сказывается влияние ползучести древесины. Учет влияния длительного действия нагрузки производится с использованием математического аппарата упругой наследственности материалов.

При нагружении до разрушения в АДК отчетливо проявляются три характерные последовательные стадии напряженно-деформированного состояния: упругая (точнее, условно-упругая, рис. 3.1, а); упругопластическая (рис. 3.1, б) и стадия разрушения (рис. 3.1, в).

На всех стадиях нагружения связь между арматурой и древесиной не нарушается вплоть до разрушения, которое в основном происходит из-за разрыва растянутых волокон древесины и текучести арматуры в зоне наибольших усилий или скалывания (раскалывания поперек волокон) древесины в опорных зонах от действия главных растягивающих напряжений. Диаграммы работы древесины и арматуры представлены на рис. 3.2, 3.3.

Таким образом, в основу расчета АДК положена первая стадия напряженно-деформированного состояния. При этом считается, что связь между арматурой и древесиной непрерывна по длине конструкции и обеспечивает их полную совместную работу на весь срок эксплуатации.

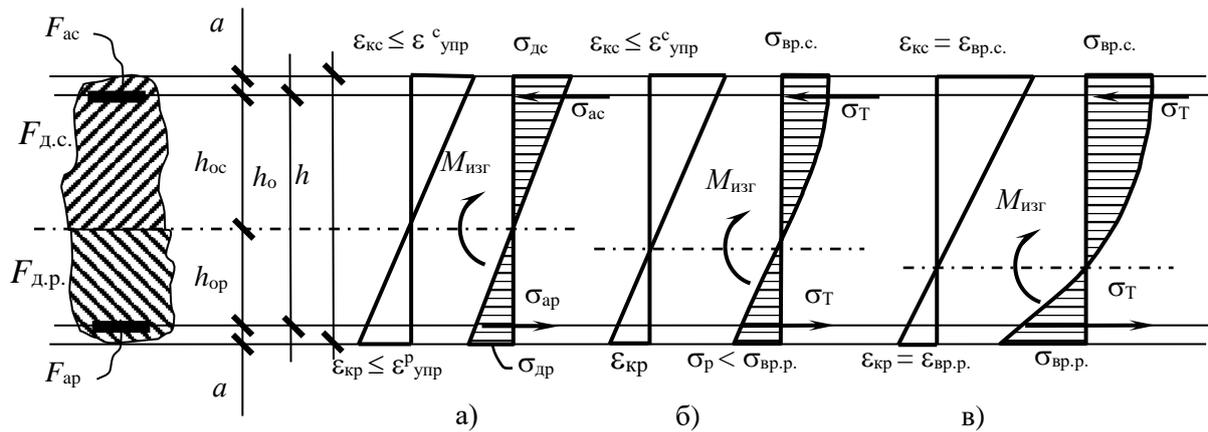


Рис. 3.1. Стадии напряженно-деформированного состояния армированного элемента при изгибе: а – условно-упругая; б – упругопластическая; в – стадия разрушения

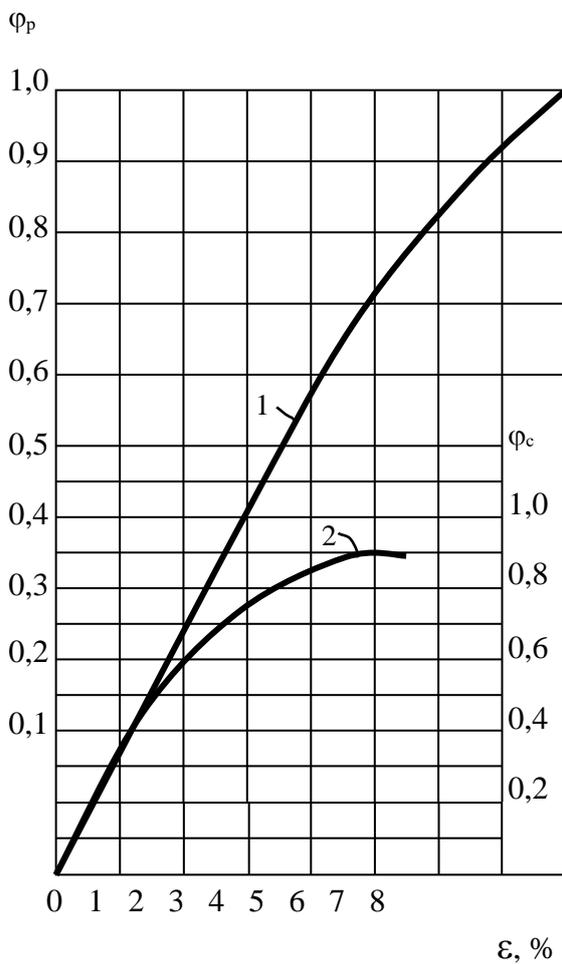


Рис. 3.2. Приведенные диаграммы работы древесины (сосна): 1 – при растяжении; 2 – при сжатии

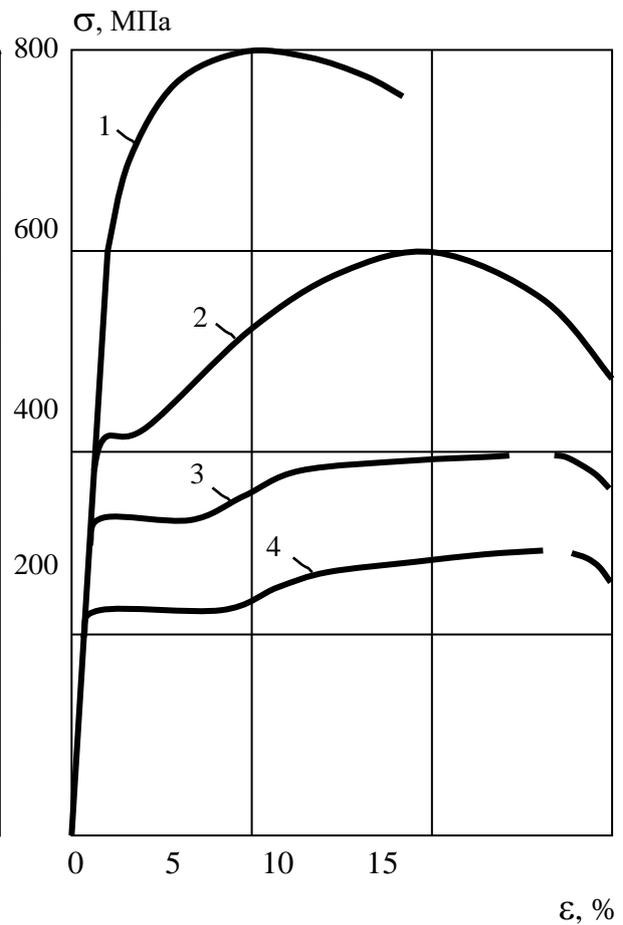


Рис. 3.3. Диаграммы растяжения арматурных сталей: 1 – класса А1000; 2 – А400; 3 – А300; 4 – А240

Инженерный расчет деревянных композитных элементов (ДКЭ) целесообразно выполнять в соответствии с требованиями СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» актуализированная редакция СНиП II-25-80 [2]. При этом армирование сечений учитывается путем приведения армирующего материала к основному, т. е. к древесине, с помощью коэффициента приведения, который представляет собой отношение модулей упругости арматуры E_a и древесины E_d . Он является постоянной величиной. Так, для конструкций, армированных стальными стержнями, коэффициент приведения составляет

$$n = \frac{E_a}{E_d} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ МПа}}{10^5 \text{ МПа}} = 20. \quad (3.1)$$

Значения модулей упругости и коэффициентов приведения относительно других армирующих материалов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Физико-механические свойства арматуры

Механические свойства	Тип арматуры по материалу					
	Стальная	Композитная				
		А400	АСК	АБК	АУК	ААК
Предел прочности при растяжении R_{fn} , не менее, МПа	360	800	800	1400	1400	1000
Модуль упругости при растяжении E_{fn} , не менее, ГПа	200	50	50	130	70	100

Примечание: АСК – стеклокомпозитная арматура; АБК – базальтокомпозитная; АУК – углекомпозитная; ААК – арамидокомпозитная; АКК – комбинированная.

Такой подход получил название метода расчета по приведенным геометрическим характеристикам.

Таким образом, геометрические характеристики приведенного сечения имеют следующий вид:

– площадь $F_{пр} = F_d + nF_a$; (3.2)

$$- \text{момент инерции } J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + nJ_{\text{а}}; \quad (3.3)$$

$$- \text{статический момент } S_{\text{пр}} = S_{\text{д}} + nS_{\text{а}}, \quad (3.4)$$

где $F_{\text{д}}$ – площадь неармированного сечения элемента;

$F_{\text{а}}$ – площадь сечения арматуры ($n_{\text{а}}$ – количество стержней арматуры);

$J_{\text{д}}$ – момент инерции неармированного сечения;

$J_{\text{а}}$ – момент инерции арматуры;

$S_{\text{д}}$ – статический момент неармированного сечения;

$S_{\text{а}}$ – статический момент арматуры.

При этом условия прочности сечений ДКЭ по первой группе предельных состояний примут следующий вид:

– при расчете на растяжение

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{д}} = \frac{N_{\text{р}}}{F_{\text{пр}}} \leq R_{\text{р}}; \quad (3.5)$$

– сжатие

$$\sigma_{\text{с}}^{\text{д}} = \frac{N_{\text{с}}}{F_{\text{пр}}} \leq \varphi R_{\text{с}}; \quad (3.6)$$

– изгиб

$$\sigma_{\text{и}}^{\text{д}} = \frac{M}{W_{\text{пр}}} \leq R_{\text{и}}; \quad (3.7)$$

– скалывание

$$\tau_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{q}} S_{\text{пр}}}{b_{\text{расч}} J_{\text{пр}}} \leq R_{\text{ск}}; \quad (3.8)$$

– проверка прочности арматуры при растяжении, сжатии, изгибе

$$\sigma_{\text{i}}^{\text{а}} = n\sigma_{\text{i}}^{\text{д}} \leq R_{\text{а}}; \quad (3.9)$$

– прочность клеевого шва древесина – арматура

$$\tau_{\text{кл}} = \frac{QS_{\text{пр}}^{\text{а}}}{DJ_{\text{пр}}} \leq R_{\text{ск}}, \quad (3.10)$$

где M – расчетный изгибающий момент;

Q – расчетное значение поперечной силы;

$R_{\text{и}}$ и $R_{\text{ск}}$ – соответственно расчетные сопротивления при изгибе и скалывании вдоль волокон;

R_a – расчетное сопротивление арматуры;

$[f]$ – предельное значение прогиба;

y – расстояние от центра сечения арматуры до нейтральной оси сечения конструкции;

D – расчетная поверхность сдвига арматуры, равная сумме периметров клеевых швов, контактирующих с древесиной.

Расчет по второй группе предельных состояний выполняется при условии, когда перемещения сечений элемента, определяемые на основе приведенных геометрических характеристик, не должны достигать предельных значений $f \leq [f]$.

Максимальный прогиб, в частности однопролетной дерево-композитной балки, будет определяться по формуле (61) СП 64.13330.2017 [2]

$$f = f_M + f_Q = f_0 \left(1 + c \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right), \quad (3.11)$$

где f_M – составляющая прогиба от действия изгибающего момента;

f_Q – составляющая прогиба от действия поперечной силы;

c – коэффициент, учитывающий влияние деформаций сдвига от поперечной силы (п. 7.35 СП 64.13330.2017 [Там же]);

$$f_0 = f_M = \frac{5ql^4}{384E_d I_{пр}} - \text{составляющая прогиба, учитывающая влия-}$$

ние изгибающих моментов при действии равномерно распределенной нагрузки, вычисленная для приведенного сечения;

l – расчетный пролет балки.

Рассмотрим выражение (3.2). Вынося за скобки величину F_d , получим следующее:

$$F_{пр} = F_d(1 + nF_a/F_d) = F_d(1 + n\mu), \quad (3.12)$$

где $\mu = \frac{F_a}{F_d}$ – коэффициент армирования.

В формуле (3.12) значение выражения, заключенного в скобки, характеризует величину соотношения площади приведенного сечения к площади неармированного сечения. Обозначим ее следующим образом:

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{д}} \beta_F, \quad (3.13)$$

где
$$\beta_F = 1 + n\mu. \quad (3.14)$$

Поскольку площадь поперечного сечения обуславливает прочность элементов при растяжении или сжатии, то величина β_F может служить показателем эффективности армирования деревянных элементов, испытывающих такое напряженно-деформированное состояние. Например, для деревянного элемента, армированного стальной арматурой ($n = 20$) при коэффициенте армирования $\mu = 0,02$ (2,0 %), повышение прочности сечения при растяжении или сжатии составит $\beta_F = 1 + n\mu = 1 + 20 \cdot 0,02 = 1,4$ раза, т. е. порядка 40 %.

Аналогичным образом можно определить прирост жесткости, а также прочности элемента на изгиб, на скалывание и т. д. Для этого необходимо выражения (3.3), (3.4), (3.5) представить в виде

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} \beta_J; \quad (3.15)$$

$$W_{\text{пр}} = W_{\text{д}} \beta_W; \quad (3.16)$$

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{д}} \beta_S, \quad (3.17)$$

где β_J , β_W , β_S – коэффициенты, отражающие величину соотношения между геометрическими характеристиками J , W , S соответственно армированного (приведенного) и неармированного сечений.

Тогда изменение жесткости согласно формуле (3.11) для армированного изгибаемого элемента будет обусловлено величиной β_J ; прочностью на изгиб (по формуле 3.7) – β_W ; на скалывание (по выражению 3.8) – β_S / β_J .

Армирование деревянных элементов выполняется, как правило, в зоне растяжения волокон. Такое решение принято называть несимметричным армированием (рис. 3.4, а, в). Однако не менее эффективно симметричное армирование сечения (рис. 3.4, б, г), при котором арматура размещается также и в сжатой зоне.

При использовании в качестве арматуры высокопрочных ламелей или тканей защитный слой, как правило, отсутствует, поэтому форма расчетного сечения соответствует схемам на рис. 3.4, а и 3.4, б в зависимости от характера армирования. Формы расчетных сечений рис. 3.4, в, г соответствуют для вариантов армирования стержнями, т. е. с устройством защитного слоя основного материала.

Перед началом выполнения расчета следует задаться некоторыми предпосылками. Они позволяют исключить факторы, которые оказывают незначительное влияние на конечный результат, но в значительно большей мере усложняют расчет.

1. При деформировании ДКЭ считается справедливой гипотеза плоских сечений.

2. Исходя из гипотезы плоских сечений (см. выше) предполагается, что деформации в древесине и арматуре в местах их соприкосновения равны и совместны и, таким образом, податливость клеевой прослойки не учитывается.

3. При армировании деревянных элементов наклеиванием ламелей или тканей центры тяжести сечений арматуры совпадает с кромкой сечения элемента (т. е. $h_0 = h$, рис. 3.4, а, б).

Геометрические характеристики несимметрично армированного сечения (рис. 3.4, а) определяются с учетом того, что нейтральная ось не совпадает с осью симметрии сечения и положение центра тяжести сечения относительно произвольной оси z' вычисляется по формуле

$$y_{ц.т} = \frac{F_d y_d + nF_a y_a}{F_d + nF_a} = \frac{bh \left(-\frac{h}{2} \right) + nF_a (-h)}{bh(1 + n\mu)} = -\frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu}{1 + n\mu} \right). \quad (3.18)$$

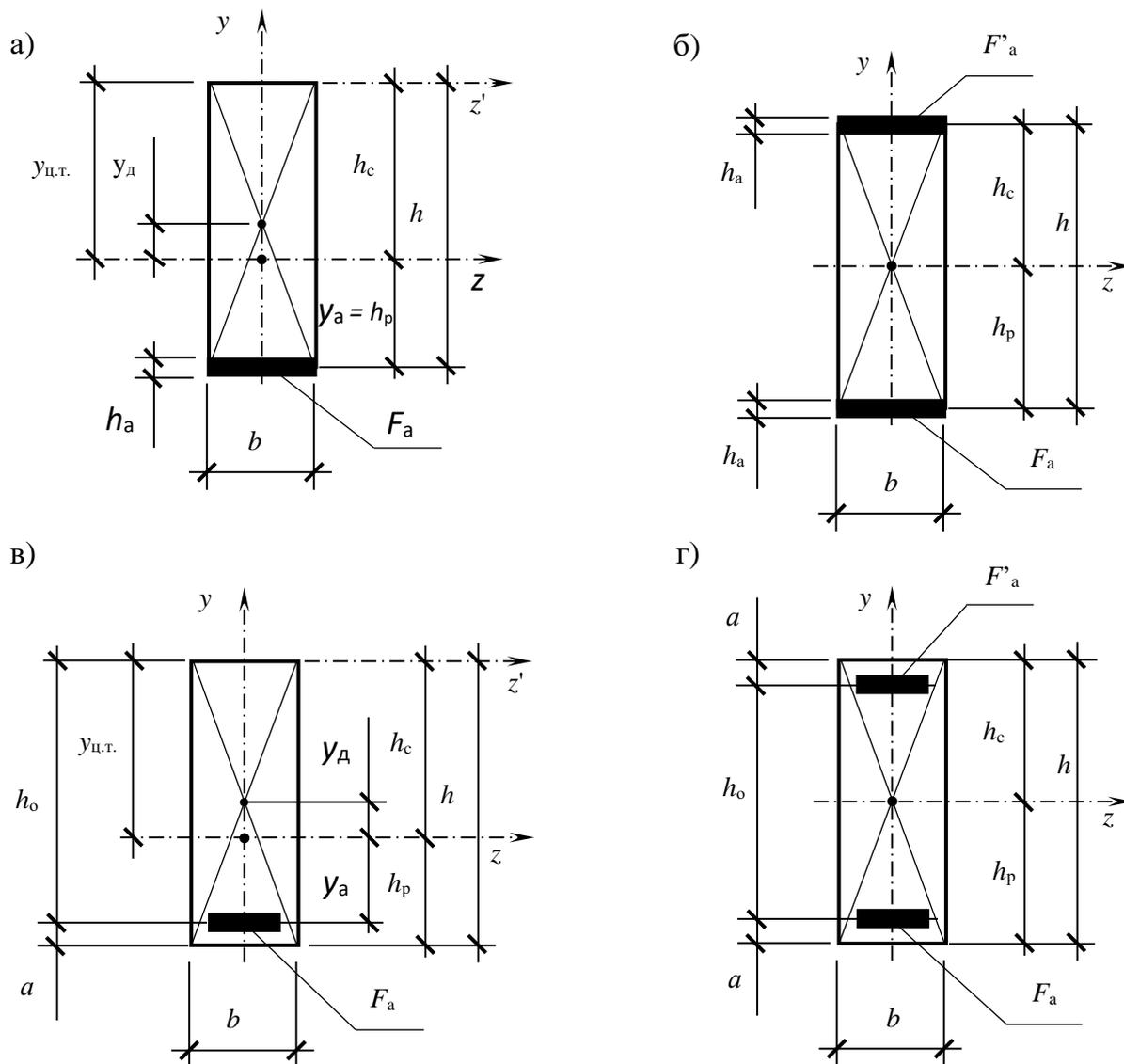


Рис. 3.4. Поперечные сечения армированных деревянных балок:
а, б – с несимметричным армированием; в, г – с симметричным армированием

Отсюда находим высоты сжатой и растянутой зон сечения, соответственно h_c и h_p :

$$h_c = |y_{ц.т.}| = \frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu}{1 + n\mu} \right);$$

$$h_p = h - h_c = \frac{h}{2(1 + n\mu)}.$$
(3.19)

Координаты центров тяжести неармированного сечения и сечения арматуры

$$y_d = \frac{h}{2} - h_p = \frac{h}{2} \left(\frac{n\mu}{1+n\mu} \right);$$

$$|y_a| = h_p = \frac{h}{2(1+n\mu)}.$$
(3.20)

Приведенный момент инерции несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси определяется по формуле (3.4) с учетом переноса главных осей координат

$$J_{\text{пр}}^H = J_d + nJ_a = (J_d' + F_d y_d^2) + n(J_a' + F_a y_a^2),$$
(3.21)

где $J_d' = \frac{bh^3}{12}$ – собственный момент инерции неармированного сечения;

J_a' – собственный момент инерции арматуры, значением которого можно пренебречь вследствие его малости.

Отсюда имеем следующее:

$$J_{\text{пр}}^H = J_d' + F_d y_d^2 + nF_a y_a^2 = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} \left(\frac{n\mu}{1+n\mu} \right) \right)^2 + nF_a \left(\frac{h}{2(1+n\mu)} \right)^2 =$$

$$= \frac{bh^3}{12} + \frac{bh^3}{4} \left(\frac{n\mu}{1+n\mu} \right)^2 + nF_a \frac{h^2}{4} \left(\frac{1}{1+n\mu} \right)^2 = \frac{bh^3}{12} \left[\frac{1+4n\mu}{1+n\mu} \right].$$
(3.22)

Далее приводим формулу (3.22) к виду, соответствующему формуле (3.15). Выражение, заключенное в скобки, не что иное, как коэффициент β_J , учитывающий соотношение моментов инерции армированного и неармированного сечений. Тогда его значение для данного варианта несимметрично армированного сечения будет иметь вид

$$\beta_J = \frac{1+4n\mu}{1+n\mu}.$$
(3.23)

Приведенный момент сопротивления несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси определяется отношением момента инерции к расстоянию до волокна, самого удаленного от нейтральной оси. Это расстояние равно высоте сжатой зоны сечения h_c . Отсюда имеем следующее

$$W_{\text{пр}}^H = J_{\text{пр}}^H : y_{\text{max}} = \frac{bh^3}{12} \left[\frac{1+4n\mu}{1+n\mu} \right] : \frac{h}{2} \left(\frac{1+2n\mu}{1+n\mu} \right) = \frac{bh^2}{6} \left[\frac{1+4n\mu}{1+2n\mu} \right],$$
(3.24)

где J_{np}^H – приведенный момент инерции несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси;

y_{max} – расстояние от центра тяжести сечения до самого удаленного от него волокна.

Приведя формулу (3.23) к виду, соответствующему формуле (3.16), получим

$$\beta_w = \frac{1+4n\mu}{1+2n\mu}. \quad (3.25)$$

Приведенный статический момент сдвигаемой части несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси при $h_{отс} = h_c$

$$S_{np}^H = \frac{bh_c^2}{2} = \frac{b}{2} \left(\frac{h}{2} \left(\frac{1+2n\mu}{1+n\mu} \right) \right)^2 = \frac{bh^2}{8} \left[\frac{1+2n\mu}{1+n\mu} \right]^2. \quad (3.26)$$

Тогда в соответствии с формулой (3.17) получим

$$\beta_s = \left(\frac{1+2n\mu}{1+n\mu} \right)^2. \quad (3.27)$$

Величина приведенного статического момента арматуры несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси

$$S_{np}^{H,a} = nF_a h_p = nF_a \frac{h}{2(1+n\mu)} = \frac{bh^2}{8} \left(\frac{4n\mu}{1+n\mu} \right). \quad (3.28)$$

В соответствии с формулой (3.17) получим

$$\beta_s^a = \frac{4n\mu}{1+n\mu}. \quad (3.29)$$

Симметрично армированное сечение (см. рис. 3.4, г) характеризуется тем, что его центр тяжести совпадает с положением центра тяжести неармированного сечения. Таким образом, высоты сжатой и растянутой зон будут равны

$$h_c = h_p = \frac{h}{2}. \quad (3.30)$$

Кроме того, коэффициент армирования учитывает суммарную площадь сечений арматуры в обеих зонах: сжатой и растянутой $\sum F_a = F_a^c + F_a^p$ или $\sum F_a = F_a + F_a'$ (см. рис. 3.4).

Тогда его геометрические характеристики для симметрично армированного сечения примут следующий вид:

– приведенный момент инерции сечения

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + nF_{\text{а}} \left(\frac{h}{2} \right)^2 = \frac{bh^3}{12} (1 + 3n\mu); \quad (3.31)$$

– приведенный момент сопротивления сечения

$$W_{\text{пр}} = J_{\text{пр}} : \frac{h}{2} = \frac{bh^2}{6} (1 + 3n\mu); \quad (3.32)$$

– приведенный статический момент сдвигаемой (отсеченной) части сечения

$$S_{\text{пр}} = S'_{\text{д}} + nF_{\text{а}}^{\text{отс}} \cdot y^{\text{отс}} = \frac{bh^2}{8} + n \frac{F_{\text{а}}}{2} \frac{h}{2} = \frac{bh^2}{8} (1 + 2n\mu); \quad (3.33)$$

– приведенный статический момент арматуры

$$S_{\text{пр}}^{\text{а}} = nF_{\text{а}}^{\text{отс}} \cdot y^{\text{отс}} = n \frac{F_{\text{а}}}{2} \frac{h}{2} = \frac{bh^2}{8} 2n\mu. \quad (3.34)$$

Далее приводим формулы (3.31) – (3.34) к видам, соответствующим формулам (3.15) – (3.17), и получаем следующее:

$$\beta_J = \beta_W = 1 + 3n\mu; \quad (3.35)$$

$$\beta_S = 1 + 2n\mu; \quad (3.36)$$

$$\beta_S^{\text{а}} = 2n\mu. \quad (3.37)$$

Геометрические характеристики сечения, армированного стержнями (см. рис. 3.4, в), определяются так же, как и для армированного ламелями, но с учетом того, что сечение арматуры располагается на некотором расстоянии от кромок сечения, т. е. с устройством защитного слоя из основного материала. Поэтому геометрические характеристики сечения с таким характером армирования будут несколько отличаться.

$$\begin{aligned} y_{\text{ц.т}} &= \frac{F_{\text{д}} y_{\text{д}} + nF_{\text{а}} y_{\text{а}}}{F_{\text{д}} + nF_{\text{а}}} = \frac{bh \left(-\frac{h}{2} \right) + nF_{\text{а}} (-h_0)}{bh(1 + n\mu)} = \\ &= -\frac{h + 2n\mu h_0}{2(1 + n\mu)} = -\frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu(h_0 / h)}{1 + n\mu} \right). \end{aligned} \quad (3.38)$$

Отсюда высоты сжатой и растянутой зон сечения h_c и h_p примут следующий вид:

$$\begin{aligned} h_c &= |y_{ц.т}| = \frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu(h_o/h)}{1 + n\mu} \right); \\ h_p &= h - h_c = \frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu(a/h)}{1 + n\mu} \right). \end{aligned} \quad (3.39)$$

Координаты центров тяжести неармированного сечения и сечения арматуры

$$\begin{aligned} y_d &= \frac{h}{2} - h_p = \frac{n\mu(h_o - a)}{2(1 + n\mu)} = \frac{h}{2} \left(\frac{n\mu}{1 + n\mu} \right) \left(2 \frac{h_o}{h} - 1 \right); \\ y_a &= h_p - a = \frac{h_o - a}{2(1 + n\mu)} = \frac{h}{2} \left(\frac{1}{1 + n\mu} \right) \left(2 \frac{h_o}{h} - 1 \right). \end{aligned} \quad (3.40)$$

Обозначим величиной k_h отношение h_o/h , тогда выражения (3.40) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} y_d &= \frac{h}{2} \left(\frac{n\mu(2k_h - 1)}{1 + n\mu} \right); \\ y_a &= \frac{h}{2} \left(\frac{2k_h - 1}{1 + n\mu} \right). \end{aligned} \quad (3.41)$$

Приведенный момент инерции несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси

$$\begin{aligned} J_{пр}^H &= J'_d + F_d y_d^2 + nF_a h_{оп}^2 = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} \right)^2 \left(\frac{n\mu(2k_h - 1)}{1 + n\mu} \right)^2 + \\ &+ nF_a \left(\frac{h}{2} \right)^2 \left(\frac{2k_h - 1}{1 + n\mu} \right)^2 = \frac{bh^3}{12} \left[1 + \frac{3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + n\mu} \right]. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Приведенный момент сопротивления несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси

$$\begin{aligned} W_{пр}^H &= J_{пр}^H : y_{max} = \frac{bh^3}{12} \left[1 + \frac{3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + n\mu} \right] : \frac{h}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu k_h}{1 + n\mu} \right) = \\ &= \frac{bh^2}{6} \left[\frac{1 + n\mu + 3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + 2n\mu k_h} \right], \end{aligned} \quad (3.43)$$

где $J_{пр}^H$ – приведенный момент инерции несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси;

y_{max} – расстояние от центра тяжести сечения до самого удаленного от него волокна.

Приведенный статический момент сдвигаемой части несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси при $h_{отс} = h_c$

$$S_{пр}^H = F_{отс}^{сж} \cdot h_{отс}^{сж} = \frac{bh_c^2}{2} = \frac{b}{2} \left(\frac{h + 2n\mu h_o}{2(1+n\mu)} \right)^2 = \frac{bh^2}{8} \left(\frac{1 + 2n\mu k_h}{1+n\mu} \right)^2;$$

$$\begin{aligned} \text{или } S_{пр}^H &= F_{рас.отс}^д \cdot y_{рас.отс}^д + nF_{рас.отс}^a \cdot y_{рас.отс}^a = \frac{bh_p^2}{2} + nF_a h_{оп} = \\ &= \frac{b}{2} \left(\frac{h + 2n\mu h_o}{2(1+n\mu)} \right)^2 = \frac{bh^2}{8} \left(\frac{1 + 2n\mu k_h}{1+n\mu} \right)^2; \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$S_{пр}^a = nF_a h_{оп} = \frac{(h_o - a)nF_a}{2(1+n\mu)} = \frac{bh^2}{8} \left(\frac{4n\mu(2k_h - 1)}{(1+n\mu)} \right), \quad (3.45)$$

где $S_{пр}^H$ – приведенный статический момент сдвигаемой части несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси;

$S_{пр}^a$ – приведенный статический момент арматуры несимметрично армированного сечения относительно нейтральной оси.

Приводим формулы (3.42) – (3.45) к виду, соответствующему формулам (3.15) – (3.17). Тогда значения коэффициентов β для данного варианта симметрично армированного сечения будут иметь вид:

$$\beta_j = 1 + \frac{3n\mu(2k_h - 1)^2}{1+n\mu}; \quad (3.46)$$

$$\beta_w = \frac{1+n\mu + 3n\mu(2k_h - 1)^2}{1+2n\mu k_h}; \quad (3.47)$$

$$\beta_s = \left(\frac{1+2n\mu k_h}{1+n\mu} \right)^2. \quad (3.48)$$

Геометрические характеристики симметрично армированного сечения (см. рис. 3.1, б) примут следующий вид:

– приведенный момент инерции сечения

$$J_{\text{пр}} = J'_d + nF_a \left(\frac{h_o}{2} \right)^2 = \frac{bh^3}{12} [1 + 3n\mu k_h^2]; \quad (3.49)$$

– приведенный момент сопротивления сечения

$$W_{\text{пр}} = J_{\text{пр}} : \frac{h}{2} = \frac{bh^2}{6} [1 + 3n\mu k_h^2]; \quad (3.50)$$

– приведенный статический момент сдвигаемой части сечения

$$S_{\text{пр}} = S'_d + nF_a \frac{h_o}{4} = \frac{bh^2}{8} (1 + 2n\mu k_h); \quad (3.51)$$

– приведенный статический момент арматуры

$$S_{\text{пр}}^a = nF_a \frac{h_o}{4} = \frac{bh^2}{8} (2n\mu k_h), \quad (3.52)$$

где $S'_d = \frac{bh^2}{8}$ – статический момент неармированного сечения;

F_a – суммарная площадь сечения арматуры;

n – коэффициент приведения армирующего материала к основному (3.1);

h_o – расстояние между центрами сечения стержней арматуры растянутой и сжатой зон;

b – ширина сечения конструкции;

μ – коэффициент армирования;

$J'_d = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции неармированного сечения;

$k_h = h_o/h$.

Коэффициенты β для данного варианта симметрично армированного сечения будут вычисляться по формулам

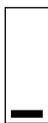
$$\beta_J = \beta_W = 1 + 3n\mu k_h^2; \quad (3.53)$$

$$\beta_S = 1 + 2n\mu k_h. \quad (3.54)$$

Выражения для определения значений коэффициентов β для различных вариантов армирования сечений ДКЭ сведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициенты β для определения геометрических характеристик приведенного сечения

№ п/п	Коэффициент		β_J	β_W	β_S
	Характер армирования		Для приведенных геометрических характеристик		
	Тип	Эскиз	Момент инерции $J_{пр} = J_d \beta_J$	Момент сопротивления $W_{пр} = W_d \beta_W$	Статический момент $S_{пр} = S_d \beta_S$
1	Несимметричное при $h = h_0$		$\frac{1 + 4n\mu}{1 + n\mu}$	$\frac{1 + 4n\mu}{1 + 2n\mu}$	$\left(\frac{1 + 2n\mu}{1 + n\mu}\right)^2$
2	Симметричное при $h = h_0$		$1 + 3n\mu$	$1 + 3n\mu$	$1 + 2n\mu$
3	Несимметричное при $h = h_0 + a$		$1 + \frac{3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + n\mu}$	$\frac{1 + n\mu + 3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + 2n\mu k_h}$	$\left(\frac{1 + 2n\mu k_h}{1 + n\mu}\right)^2$
4	Симметричное при $h = h_0 + 2a$		$1 + 3n\mu k_h^2$	$1 + 3n\mu k_h^2$	$1 + 2n\mu k_h$
где $k_h = h_0/h$					

3.2. Пример расчета двускатной дощато-клееной балки, армированной стальной арматурой

Задание. Спроектировать двускатную балку (рис. 3.5) пролетом 18,0 м с одиночным армированием растянутой зоны под рулонную кровлю по плитам с деревянным каркасом размерами 1,5×6,0 м. Снеговой район III ($p = 1,5$ кПа). Полная расчетная нагрузка $q = 15,0$ кН/м,

нормативная $q^H = 11,2$ кН/м, $\gamma_f^{cp} = 1,25$. Постоянная нагрузка на балку 5,0 кН/м (включает собственный вес конструкции, покрытия и оборудования), что составляет 1/3 от полного значения расчетной нагрузки.

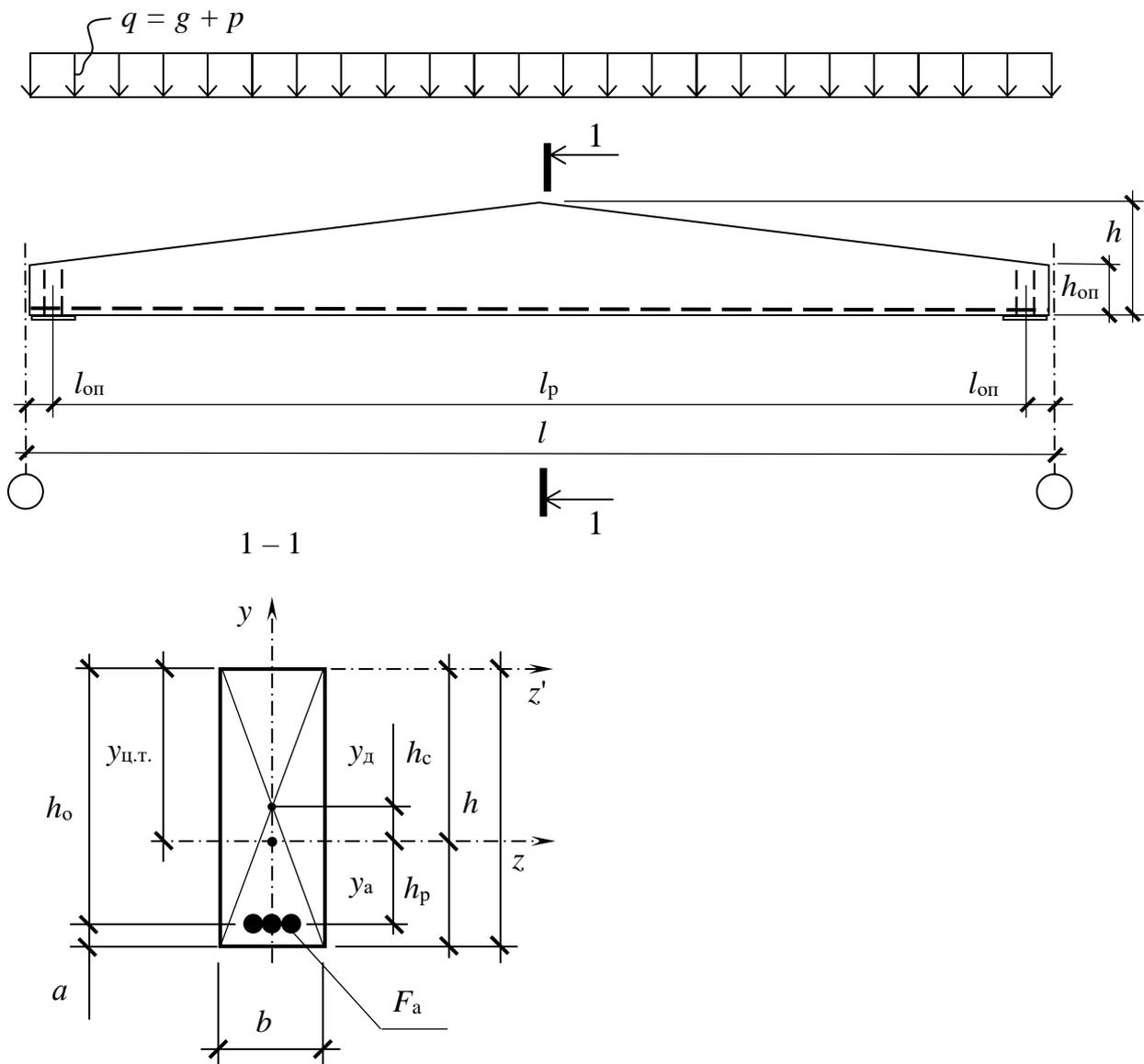


Рис. 3.5. Двускатная деревокомпозитная балка (армированная стальными стержнями)

Выполнение расчета. Древесина балки – сосна третьего сорта с расчетными сопротивлениями соответственно на изгиб и на скалывание: $R_{и}^A = 13$ МПа; $R_{ск}^A = 2,25$ МПа. Модуль упругости древесины $E_d = 10\,000$ МПа. Арматура из стали класса А400 с $R_a = 400$ МПа. Расчетный пролет балки $l_p = (l - 2l_{оп})/2 = 17,7$ м.

Здание 2-го класса ответственности по назначению, тогда $\gamma_n = 1$ (ГОСТ 27751-2014). Условия эксплуатации относятся ко 2-му классу (нормальный): внутри отапливаемых помещений с максимальной относительной влажностью воздуха до 65 % при температуре до 35 °С. При этих условиях $m_b = 1,0$ (СП 64.13330.2017, табл. 9), $m_t = 1,0$ [2, п. 6.9, б]. Коэффициент длительной прочности $m_{дл} = 0,66$, соответствующий режиму длительности загрузки Γ [2, табл. 4]. Коэффициент $m_a = 0,9$ – для элементов, подвергнутых глубокой пропитке антипиренами под давлением.

Значения расчетных сопротивлений с учетом коэффициентов условий работы и надежности по ответственности будут равны

$$R_{и} = R_{и}^A m_{дл} \Pi m_i / \gamma_n = 13,0 \cdot 0,66 \cdot 0,9 / 1,0 = 7,72 \text{ МПа};$$

$$R_{ск} = R_{ск}^A m_{дл} \Pi m_i / \gamma_n = 2,25 \cdot 0,66 \cdot 0,9 / 1,0 = 1,34 \text{ МПа}.$$

При заданной нагрузке требуемая высота сечения балки в середине пролета

$$h^{\max} = l/12 = 1,50 \text{ м}.$$

Принимаем сечение, состоящее в середине пролета из 46 досок толщиной 3,3 см, шириной 22,5 см. Древесина – сосна 3-го сорта.

$$h^{\max} = 46 \cdot 3,3 = 151,8 \text{ см}; \quad h^{\max}/b = 151,8/22,5 = 6,7.$$

Уклон верхнего пояса определяется в зависимости от условия $h_{оп} \geq 0,5 h^{\max}$ и равен $i = 2(h^{\max} - h_{оп})/l$.

$$h_{оп} = 0,5 h^{\max} = 0,5 \cdot 151,8 = 75,9 \text{ см};$$

$$i = 2(151,8 - 75,9)/1770 = 0,0858.$$

Расчетное сечение находится на расстоянии

$$x = l h_{оп} / (2h) = 1770 \cdot 75,9 / (2 \cdot 151,8) = 442,5 \text{ см от опор}.$$

Применяется одиночное армирование, т. е. вся арматура расположена в растянутой зоне.

Расчетная высота сечения в зоне нормальных максимальных напряжений:

$$h_x = h_{оп} + ix = 75,9 + 0,0858 \cdot 442,5 = 113,9 \text{ см}.$$

$$\text{При этом } W_x^д = 22,5 \cdot 113,9^2 / 6 = 48\,606,8 \text{ см}^3.$$

Изгибающий момент в расчетном сечении

$$M_x = qx(l - x)/2 = 15 \cdot 4,425(17,7 - 4,425)/2 = 440,56 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_x^{\text{треб}} = M_x \gamma_n / R_{и} = 440,56 \cdot 10^3 \cdot 1,0 / 7,72 = 57\,053,1 \text{ см}^3.$$

Требуемое значение коэффициента армирования для принятого сечения из условий обеспечения прочности балки

$$\mu_{\text{тр}}^W = \frac{W_{\text{тр}} - W_{\text{д}}}{3nW_{\text{д}}} = (57\,053,1 - 48\,606,8)/(3 \cdot 20 \cdot 48\,606,8) = 0,0029 < 0,01,$$

поэтому принимаем $\mu_{\text{тр}} = 0,01$.

Требуемая площадь сечения арматуры

$$F_a^{\text{тр}} = 0,01 \cdot 22,5 \cdot 113,9 = 25,62 \text{ см}^2.$$

Принимаем $3\varnothing 36 \text{ A400}$ с $F_a = 30,54 \text{ см}^2 > F_a^{\text{тр}}$.

Фактический коэффициент армирования расчетного сечения

$$\mu_x = 30,54/(22,5 \cdot 113,9) = 0,0119.$$

Тогда высота сечения до центра тяжести сечения арматуры составит

$$h_{0x} = h_x - a = 113,9 - (3,6/2 + 2,5) = 109,55 \text{ см},$$

где $a = d_a/2 + 25$ мм – привязка центра тяжести арматуры к ближайшей кромке сечения с учетом диаметра стержней арматуры и толщины защитного слоя древесины.

Проверяем возможность размещения стержней по ширине сечения

$$m_{\text{ст}}(d_a + 0,5) + (m_{\text{ст}} + 1)d_a = 3(3,6 + 0,5) + (3 + 1)3,6 = 23,9 > b = 22,5 \text{ см}.$$

Поскольку разместить стержни в отдельных пазах невозможно, принимаем групповое армирование, т. е. размещение стержней арматуры в общем пазу.

Таким образом, тип сечения можно охарактеризовать как несимметрично армированный с внутренним размещением арматуры, который соответствует № 3 по табл. 3.2.

Отсюда геометрические характеристики расчетных сечений:

– приведенный момент инерции

$$J_{\text{пр.х}}^{\text{н}} = J_{\text{д.х}} \beta_{Jx} = \frac{bh_x^3}{12} \left(1 + \frac{3n\mu_x(2k_{hx} - 1)^2}{1 + n\mu_x} \right) =$$

$$= \frac{22,5 \cdot 113,9^3}{12} \left(1 + \frac{3 \cdot 20 \cdot 0,0119(2 \cdot 109,55/113,9 - 1)^2}{1 + 20 \cdot 0,0119} \right) = 4\,132\,673,7 \text{ см}^4;$$

– расчетные высоты соответственно сжатой и растянутой зон древесины, а также расстояние от центра тяжести приведенного сечения до центра тяжести арматуры:

$$h_{c.x} = \frac{h_x}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu_x k_{hx}}{1 + n\mu_x} \right) = \frac{113,9}{2} \left(\frac{1 + 2 \cdot 20 \cdot 0,0119 \cdot 109,55 / 113,9}{1 + 20 \cdot 0,0119} \right) = 67,1 \text{ см};$$

$$h_{p.x} = \frac{h_x}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu_x (a / h_x)}{1 + n\mu_x} \right) = \frac{113,9}{2} \left(\frac{1 + 2 \cdot 20 \cdot 0,0119 \cdot 4,3 / 113,9}{1 + 20 \cdot 0,0119} \right) = 46,8 \text{ см};$$

$$h_{p.x}^a = y_x^a = \frac{h_x}{2} \left(\frac{2k_{hx} - 1}{1 + n\mu_x} \right) = \frac{113,9}{2} \left(\frac{2 \cdot 109,55 / 113,9 - 1}{1 + 20 \cdot 0,0119} \right) = 42,5 \text{ см}$$

или иначе $h_{p.x}^a = h_{p.x} - a = 46,8 - 4,3 = 42,5 \text{ см};$

– приведенные моменты сопротивления для проверки прочности соответственно древесины и арматуры

$$W_{пр.x}^c = \frac{J_{пр.x}^H}{h_{c.x}} = 4\,132\,673,7 / 67,1 = 61\,630,1 \text{ см}^3;$$

$$W_{пр.x}^{p.a} = \frac{J_{пр.x}^H}{h_{p.x}^a} = 4\,132\,673,7 / 42,5 = 97\,253,4 \text{ см}^3.$$

Геометрические характеристики опорных сечений определяем аналогично при $h_{оп} = 75,9 \text{ см}$ и $h_{0оп} = h_{оп} - a = 75,9 - (3,6/2 + 2,5) = 71,6 \text{ см};$

$$\mu_{оп} = 30,54 / (22,5 \cdot 75,9) = 0,0179;$$

$$\begin{aligned} J_{пр.оп}^H &= J_{д.оп} \beta_{J_{оп}} = \frac{bh_{оп}^3}{12} \left(1 + \frac{3n\mu_{оп} (2k_{hоп} - 1)^2}{1 + n\mu_{оп}} \right) = \\ &= \frac{22,5 \cdot 75,9^3}{12} \left(1 + \frac{3 \cdot 20 \cdot 0,0179 (2 \cdot 71,6 / 75,9 - 1)^2}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right) = 1\,329\,210,8 \text{ см}^4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{c.оп} &= \frac{h_{оп}}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu_{оп} k_{hоп}}{1 + n\mu_{оп}} \right) = \\ &= \frac{75,9}{2} \left(\frac{1 + 2 \cdot 20 \cdot 0,0179 \cdot 71,6 / 75,9}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right) = 46,8 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{p.оп} &= \frac{h_{оп}}{2} \left(\frac{1 + 2n\mu_{оп} (a / h_{оп})}{1 + n\mu_{оп}} \right) = \\ &= \frac{75,9}{2} \left(\frac{1 + 2 \cdot 20 \cdot 0,0179 \cdot 4,3 / 75,9}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right) = 29,1 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$h_{\text{п.оп}}^a = \frac{h_{\text{оп}}}{2} \left(\frac{2k_{h\text{оп}} - 1}{1 + n\mu_{\text{оп}}} \right) = \frac{75,9}{2} \left(\frac{2 \cdot 71,6 / 75,9 - 1}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right) = 24,8 \text{ см.}$$

Статический момент сдвигаемой части опорного сечения

$$S_{\text{пр.оп}}^{\text{н}} = \frac{bh_{\text{оп}}^2}{8} \left(\frac{1 + 2n\mu_{\text{оп}}k_{h\text{оп}}}{1 + n\mu_{\text{оп}}} \right)^2 = \frac{22,5 \cdot 75,9^2}{8} \times$$

$$\times \left(\frac{1 + 2 \cdot 20 \cdot 0,0179 \cdot 71,6 / 75,9}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right)^2 = 24\,654,9 \text{ см}^3.$$

Статический момент арматуры в опорном сечении относительно нейтральной оси

$$S_{\text{пр.оп}}^a = \frac{bh_{\text{оп}}^2}{8} \left(\frac{4n\mu_{\text{оп}}(2k_{h\text{оп}} - 1)}{1 + n\mu_{\text{оп}}} \right) = \frac{22,5 \cdot 75,9^2}{8} \times$$

$$\times \left(\frac{4 \cdot 20 \cdot 0,0179(2 \cdot 71,6 / 75,9 - 1)}{1 + 20 \cdot 0,0179} \right) = 15\,137,5 \text{ см}^3.$$

Расчетная поверхность сдвига клевого шва арматура – древесина $D_{\text{расч}} = 0,9(n_{\text{ст}} + 2)(d_a + 0,5) = 0,9(3 + 2)(3,6 + 0,5) = 18,45 \text{ см.}$

Проверка прочности деревокомпозитной двускатной балки

Проверка прочности расчетного сечения:

1) по древесине

$$M_x / W_{\text{пр.х}}^c = 440,56 \cdot 10^3 / 61\,630,1 = 7,15 < R_{\text{и}} = 7,72 \text{ МПа;}$$

2) по арматуре

$$M_x n / W_{\text{пр.х}}^p = 440,56 \cdot 10^3 \cdot 20 / 97\,253,4 = 90,6 < R_a / \gamma_n = 400 \text{ МПа.}$$

Проверка прочности опорных сечений:

1) по древесине на действие касательных напряжений

$$\tau = \frac{Q_{\text{оп}} S_{\text{пр.оп}}}{J_{\text{пр.оп}}^{\text{н}} b} = \frac{132,8 \cdot 10 \cdot 24\,654,9}{1\,329\,210,7 \cdot 22,5} = 1,094 \text{ МПа} < R_{\text{ск}} = 1,34 \text{ МПа;}$$

2) по клеевому шву арматура – древесина

$$\tau = \frac{Q_{\text{оп}} S_{\text{пр.оп}}^a}{J_{\text{пр.оп}}^{\text{н}} D_{\text{расч}}} = \frac{132,8 \cdot 10 \cdot 15\,137,5}{1\,329\,210,7 \cdot 18,45} = 0,819 \text{ МПа} < R_{\text{ск}}^A m_{\text{дл}} = 1,485 \text{ МПа.}$$

Проверка деформативности деревокомпозитной балки

Геометрические характеристики сечения в середине пролета для $h_{\max} = 151,8$ см, $h_0 = h - a = 151,8 - (3,6/2 + 2,5) = 147,5$ см, $\mu = F_a/(bh) = 30,54/(22,5 \cdot 151,8) = 0,0089$:

$$J_{\text{пр.макс}}^{\text{н}} = J_{\text{д.макс}} \beta_{J_{\text{макс}}} = \frac{bh_{\max}^3}{12} \left(1 + \frac{3n\mu(2k_h - 1)^2}{1 + n\mu} \right) =$$
$$= \frac{22,5 \cdot 151,8^3}{12} \left(1 + \frac{3 \cdot 20 \cdot 0,0089 (2 \cdot 147,5 / 151,8 - 1)^2}{1 + 20 \cdot 0,0089} \right) = 9\,214\,684,0 \text{ см}^4.$$

Прогиб балки проверяем по формуле (3.11) и п. 7.35 СП 64.13330.2017 [2]

$$f = \frac{f_o}{k} K_1 \left(1 + c \left(\frac{h_{\max}}{l_p} \right)^2 \right) = \frac{2,08}{0,575} 1,11 \left(1 + 17,3 \left(\frac{151,8}{1770} \right)^2 \right) = 4,49 \text{ см.}$$

Таким образом, $f/l = 4,49/1770 = 1/394$, что не превышает предельного значения $[f/l] = 1/233$ (табл. Д.1 СП 20.13330.2016 [1]),

где $f_o = 5 \cdot 11,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1770^4 / (384 \cdot 9\,214\,684,0 \cdot 10^3) = 2,08$ см;

$$k = 0,15 + 0,85 \cdot h_{\text{оп}}/h^{\max} = 0,15 + 0,85 \cdot 75,9/151,8 = 0,575;$$

$c = 15,4 + 3,8 \cdot h_{\text{оп}}/h^{\max} = 15,4 + 3,8 \cdot 75,9/151,8 = 17,3$ (по СП 64.13330.2017 [2]);

$K_1 = 1,10$ – коэффициент, учитывающий упругую податливость клеевого соединения арматуры с древесиной в зоне анкеровки.

Необходимая жесткость обеспечена.

Расход древесины на балку составляет $4,61 \text{ м}^3$, арматурной стали – $431,5$ кг, клеевой композиции (по диаграмме на рис. 3.3) – 43 кг.

Вопросы для самопроверки

1. Какой перечень основных нормативных документов лежит в основе выполнения расчета деревокомпозитных элементов?

2. Какие принципы метода расчета по приведенным геометрическим характеристикам вы можете назвать?

3. Дайте понятие коэффициента приведения: физический смысл, определение его значения.

4. Охарактеризуйте коэффициент армирования сечения: физический смысл, определение его значения.

5. Каково влияние коэффициента приведения на прочность и жесткость деревокомпозитного элемента?

6. Проанализируйте особенности влияния коэффициента армирования на прочность и жесткость деревокомпозитного элемента.

7. Симметрично армированное сечение: характеристики и особенности.

8. Несимметрично армированное сечение: характеристики и особенности.

9. Каковы особенности размещения стержневой арматуры в теле дощато-клееной заготовки?

10. Какие конструктивные решения по обеспечению надежности приопорных сечений деревокомпозитных элементов вам известны?

Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ДЕРЕВОКОМПОЗИТНОГО ЗДАНИЯ В ЧИСЛЕННОМ ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ

4.1. Разработка модели каркаса многоэтажного деревокомпозитного здания в программном комплексе ПК STARK ES

4.1.1. Исходные данные для расчета

Район строительства – г. Волгоград. Пролет конструкций – 7,04 м. Количество этажей – 7. Шаг поперечных рам здания 4,4 м. Класс арматуры А500. Дополнительные данные: количество пролетов 4, количество шагов 8.

Сбор нагрузок на 1 м² перекрытия производится согласно [1] и представлен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Сбор нагрузок на 1 м² перекрытия

Вид нагрузки	Нормативное значение q^n , кг/м ²	Коэффициент надежности γ_f	Расчетное значение q^p , кг/м ²
Постоянная			
Настил дощатый $t = 40$ мм	20	1,1	22
Утеплитель (пароизоляция) $t = 200$ мм, $p = 30$ кг/м ³	6	1,2	7,2
Пароизоляция $p = 0,8$ кг/м ³	0,8	1,2	0,96
Нижняя обшивка – вагонка	6	1,1	6,6
Итого	32,8		36,76
Временная			
Полезная нагрузка	400	1,2	480
Итого	400		480
ВСЕГО	432,8		516,76

Сбор нагрузок на 1 м² покрытия приведен в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Сбор нагрузок на 1 м² покрытия

Вид нагрузки	Нормативное значение q^n , кг/м ²	Коэффициент надежности γ_f	Расчетное значение q^p , кг/м ²
Постоянная			
Настил дощатый $t = 40$ мм	20	1,1	22
Утеплитель (пароизоляция) $t = 200$ мм, $\rho = 30$ кг/м ³	6	1,2	7,2
Пароизоляция $\rho = 0,8$ кг/м ³	0,8	1,2	0,96
Нижняя обшивка – вагонка	6	1,1	6,6
Вес кровли	20	1,25	25
Итого	52,8		61,76
Временная			
Снеговое покрытие	100	1,4	140
Итого	100		140
ВСЕГО:	152,8		201,76

4.1.2. Начало работы

В STARK_ES создаем новый проект, выбрав в меню «Проекты» команду «Создать». На экране появится окно «Создать FE-модель». В этом окне задаем тип проекта (FEA-проект) и выбираем опцию «Создать в корневой директории \StarkPrj». Далее необходимо ввести имя файла, содержащего не более 8 символов (в имени не допускается использование символов ‘пробел’, ‘;’, ‘*’, ‘/’, ‘\’ и др.), имя проекта (имя каталога, в котором будут храниться файлы проекта), имя исполнителя (своя фамилия). В качестве имени проекта рекомендуем использовать свою фамилию. Это облегчит поиск своих данных на жестком диске.

Компоновочная схема каркаса многоэтажного здания гражданского назначения в осях YZ приведена на рис. 4.1.

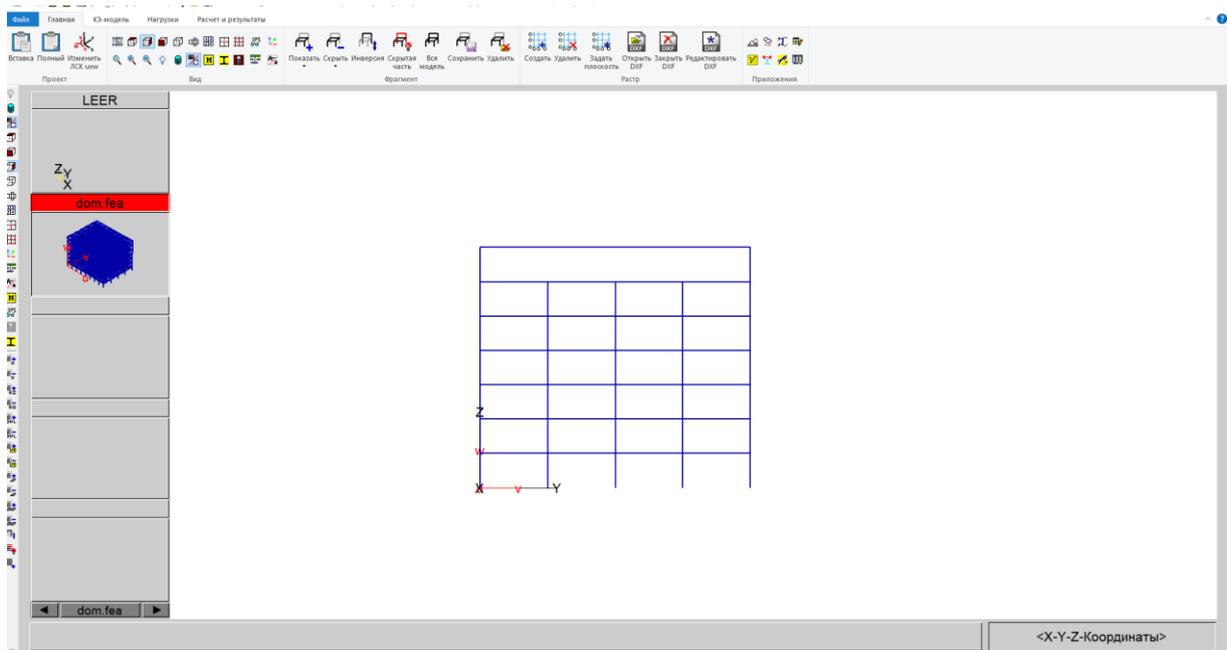


Рис. 4.1. Компоновочная схема каркаса многоэтажного здания гражданского назначения в осях YZ

Комповочная схема каркаса многоэтажного здания гражданского назначения в осях XZ показана на рис. 4.2.

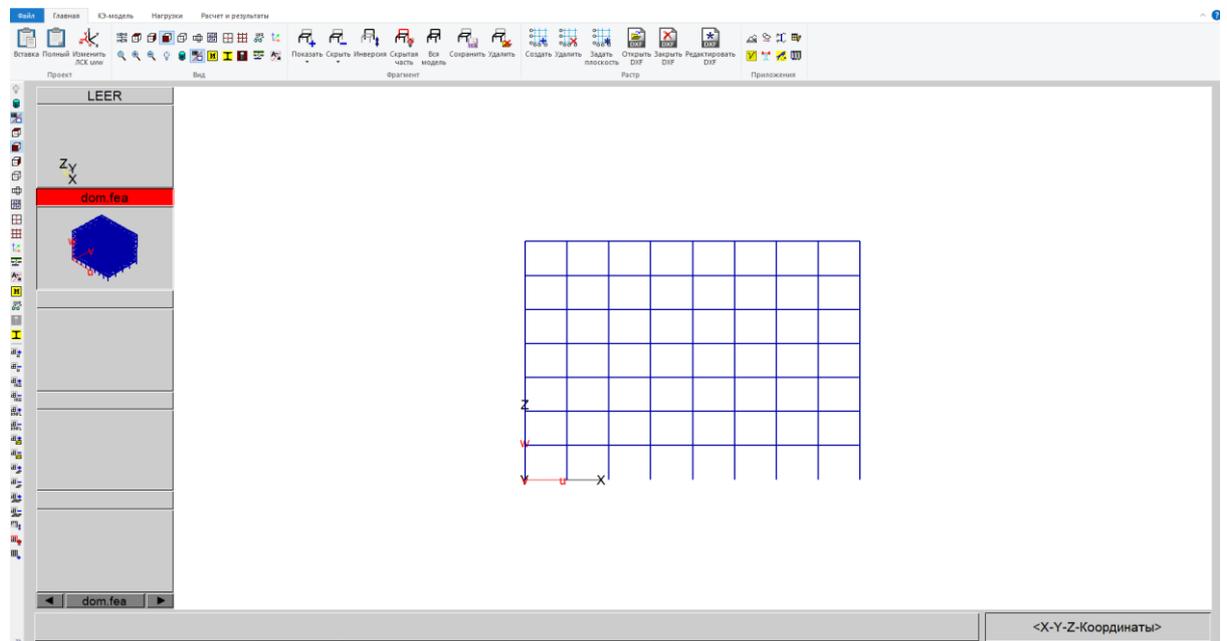


Рис. 4.2. Компоновочная схема каркаса многоэтажного здания гражданского назначения в осях XZ

Общий вид многоэтажного здания в 3D представлен на рис. 4.3.

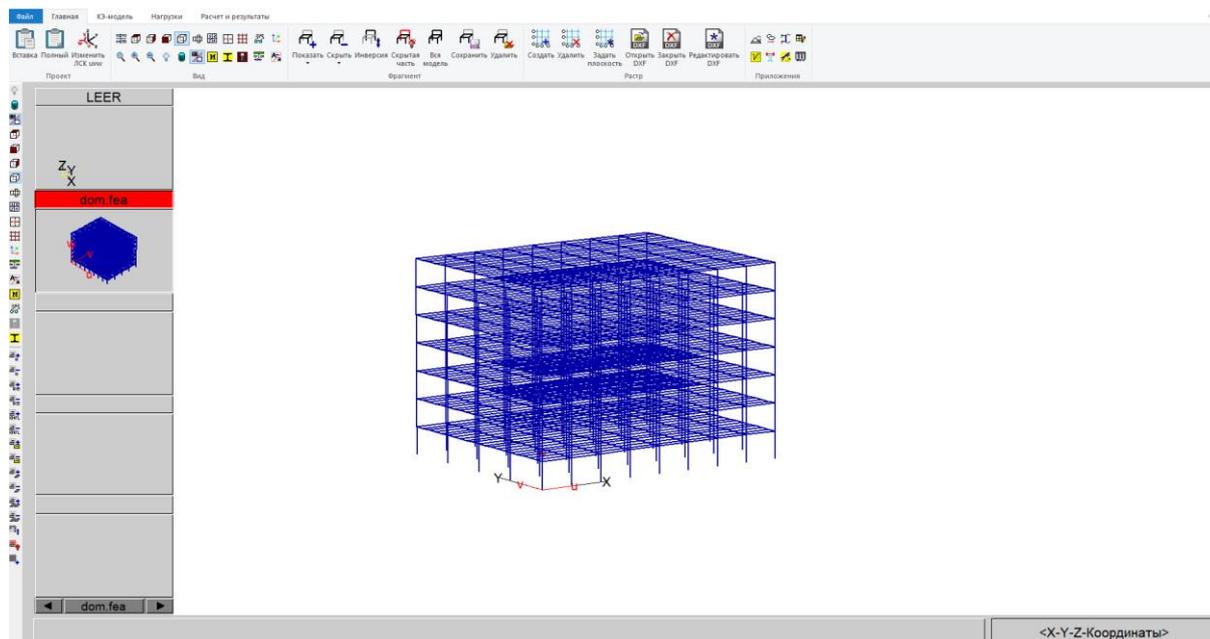


Рис. 4.3. Общий вид многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов

4.1.3. Формирование геометрической модели

Заданная рама представляет собой объемную систему. Поэтому ее геометрическую модель удобно формировать в плоскости XYZ.

На вкладке «КЭ-модель» выбираем «Стержни и пластины: – установить». После этого в разделе «Координаты панели свойств» последовательно для каждого конечного элемента указываем координаты начального и конечного узлов.

В случае необходимости геометрическую модель рамы можно отредактировать в табличной форме. Для этого на вкладке «Главная» выбираем кнопку «Редактировать». Появится окно «Редактирование FEA-модели в табличной форме».

На экране появится геометрическая модель рамы. Если отображается часть рамы, то необходимо выполнить автомаштабирование при помощи клавиши “0” на дополнительной цифровой клавиатуре.

4.1.4. Назначение характеристик материала

Для назначения характеристик материала на вкладке «КЭ-модель» выберем «Материалы – Назначить». На панели свойств включаем кнопку «Стержни» и нажимаем кнопку «Новый материал». На экране появиться окно «Новый материал» (рис. 4.4).

Для элементов должны быть указаны:

- площадь поперечного сечения A , м²;
- момент инерции при изгибе I_t , м⁴;
- модуль упругости материала стержня E , кПа;
- сдвиговая площадь A_q , м²;
- модуль сдвига G , кПа ($G = E/(2(1 + \nu))$), где ν – коэффициент Пуассона);
- плотность материала стержня R_{ho} , т/м³.

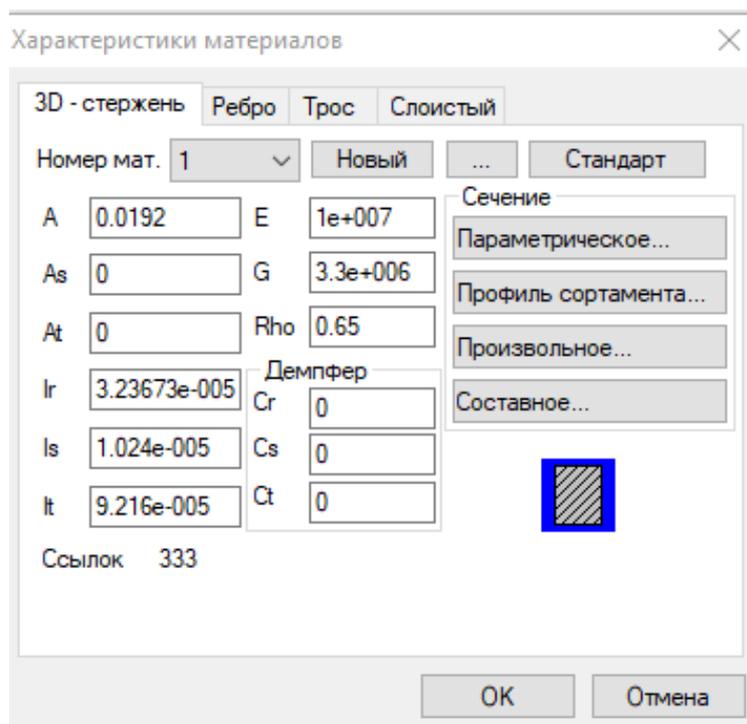


Рис. 4.4. Характеристики материалов

Площадь сдвига задается в том случае, когда необходимо учесть поперечные сдвиговые деформации. В данном расчете сдвиговые деформации не учитываем. Поэтому величину площади сдвига задаем равной нулю. Тогда STARK_ES будет считать жесткость на сдвиг бесконечно большой.

При задании плотности автоматически определяется собственный вес системы. После этого снова нажимаем кнопку «Новый материал» на панели свойств. В появившемся окне «Новый материал» устанавливаем жесткостные характеристики. После нажатия на кнопку «ОК» выбираем элементы на схеме. Выбранные элементы будут отмечены числом.

Зададим геометрические параметры сечений стержневых элементов многоэтажного деревокомпозитного каркасного здания: колонна сечением 80×240 (h) мм, главная балка сечением 90×350 (h) мм, второстепенная балка сечением 50×240 (h) мм, стропильная балка сечением 90×1500 (h) (рис. 4.5 – 4.8).

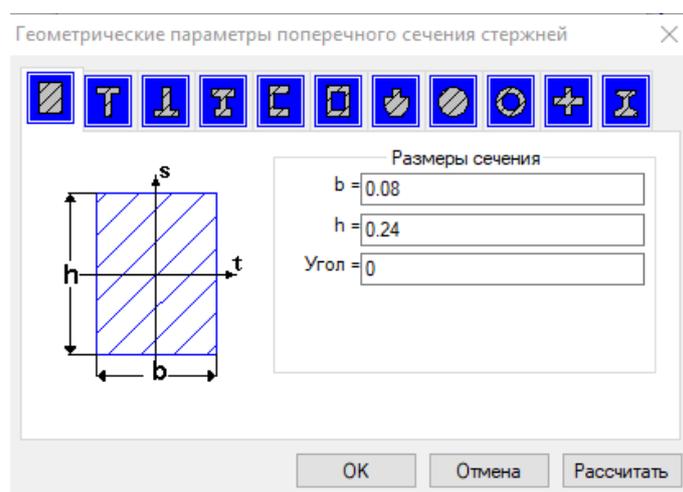


Рис. 4.5. Размеры сечений колонны из армированных клееных деревянных элементов

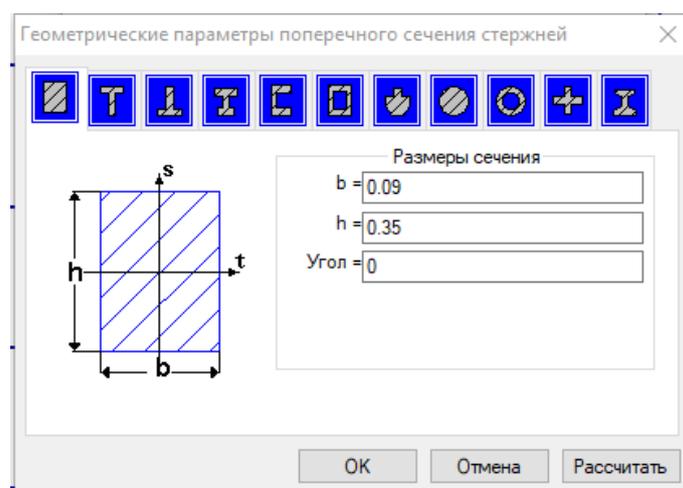


Рис. 4.6. Размеры сечений главной балки из армированных клееных деревянных элементов

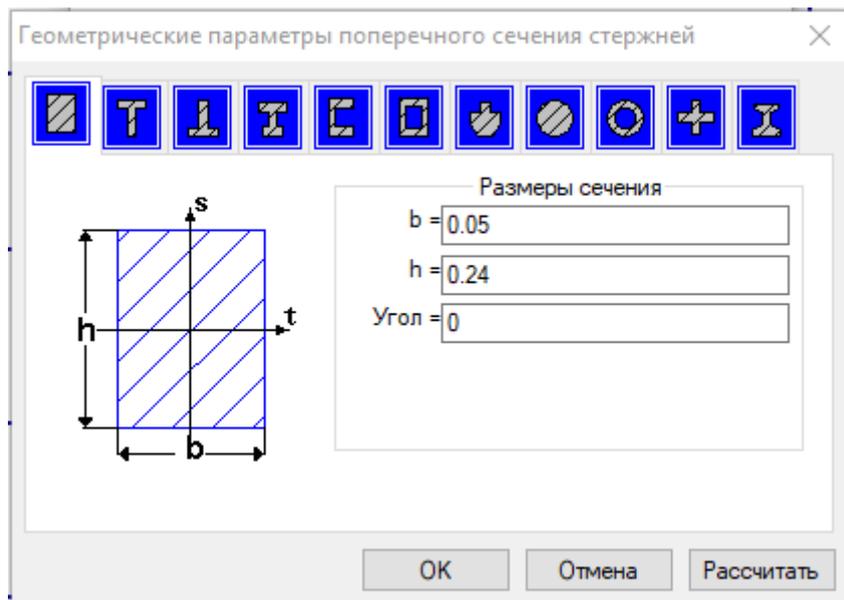


Рис. 4.7. Размеры сечений второстепенной балки из армированных клееных деревянных элементов

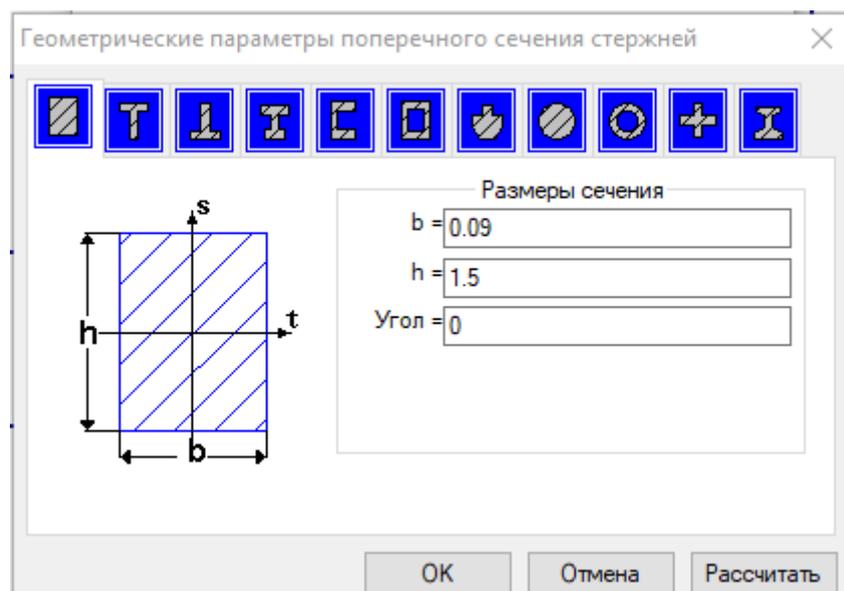


Рис. 4.8. Размеры сечений стропильной балки из армированных клееных деревянных элементов

4.1.5. Установка опор

Для установки шарнира на вкладке «КЭ-модель» выбираем «Узловые – Установить». На панели свойств устанавливаем глобальную систему координат (ГСК) и направление освобождаемой связи – угловую связь R_z . Остальные направления (X и Y) отключаем. Отмечаем на

схеме соответствующий узел, изображенный желтым кружком с числом 32.

Стержневая система часто опирается на основание, которое считается жестким. В этом случае в узел, который присоединяется к жесткому основанию, вводятся жесткие связи (рис. 4.9).

В общей системе осей координат связи X , Y , Z означают закрепление узла в направлении одноименных осей общей системы координат.

Связи UX , UY , UZ означают закрепление узла от поворотов относительно указанных осей общей системы координат.

Шарниры устанавливаются в местах сопряжения колонны и главной балки, главной балки и второстепенной балки. Эти шарниры, по сути, означают, что в месте их установки удалена связь, мешающая сечению элемента, соединенному с узлом, поворачиваться вокруг оси Y .

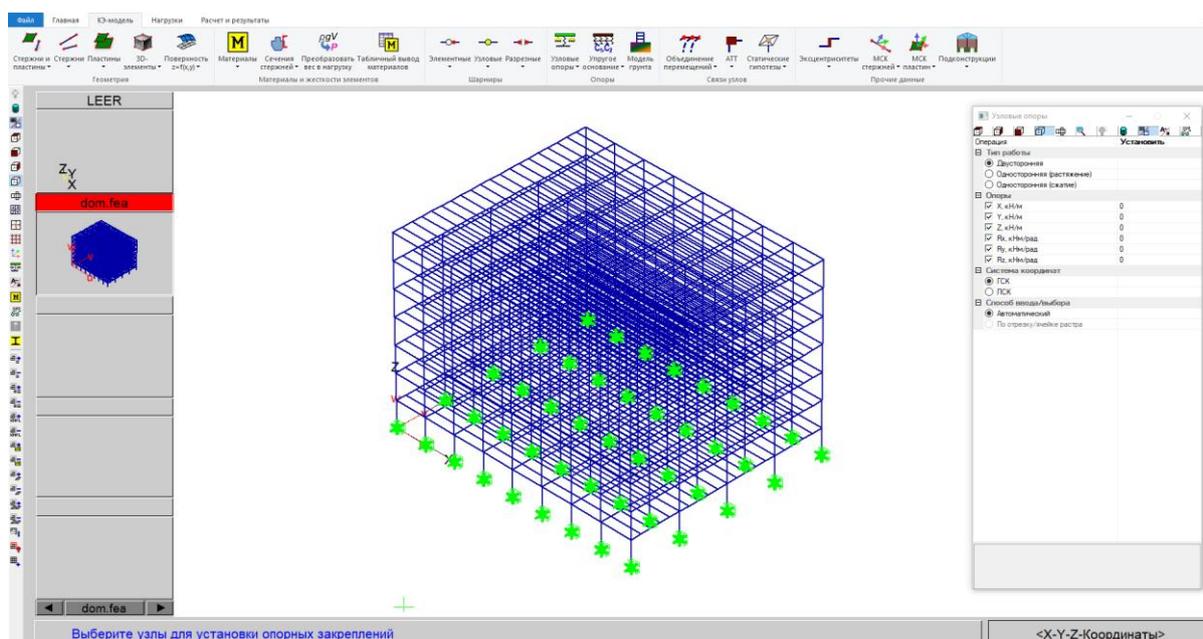


Рис. 4.9. Опорные связи и шарниры в узлах элементов

4.1.6. Назначение нагрузок

На заданную раму действуют узловые и элементные нагрузки. Сначала зададим узловые нагрузки. Для этого на вкладке «Нагрузки» выбираем «Силы и Моменты: – Установить».

В ПК STARK ES задаются следующие виды нагрузок: собственный вес, постоянная нагрузка на перекрытие и покрытие, полезная нагрузка на перекрытие и покрытие, снеговая нагрузка на покрытие,

ветровая нагрузка. Расчет выполнен по нормам проектирования СП 20.13330.2016 с изменениями № 1, 2, 3, 4» (см. табл. 4.1, 4.2) (рис. 4.10 – 4.15).

Постоянная нагрузка на перекрытие задается вдоль оси z со значением $P_z = 0,05$ тс (рис. 4.10).

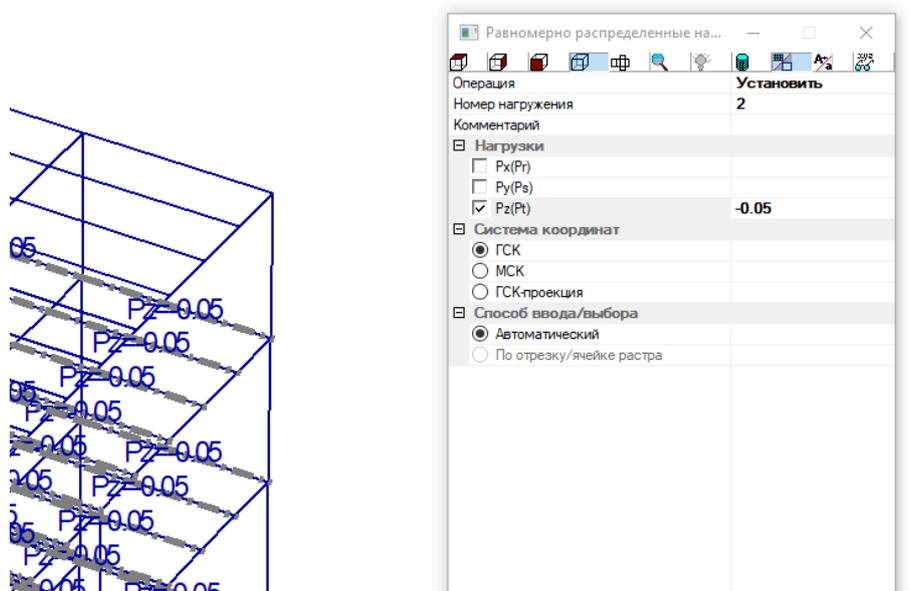


Рис. 4.10. Постоянная нагрузка на перекрытие

Постоянная нагрузка на покрытие задается вдоль оси z со значением $P_z = 0,075$ тс (рис. 4.11).

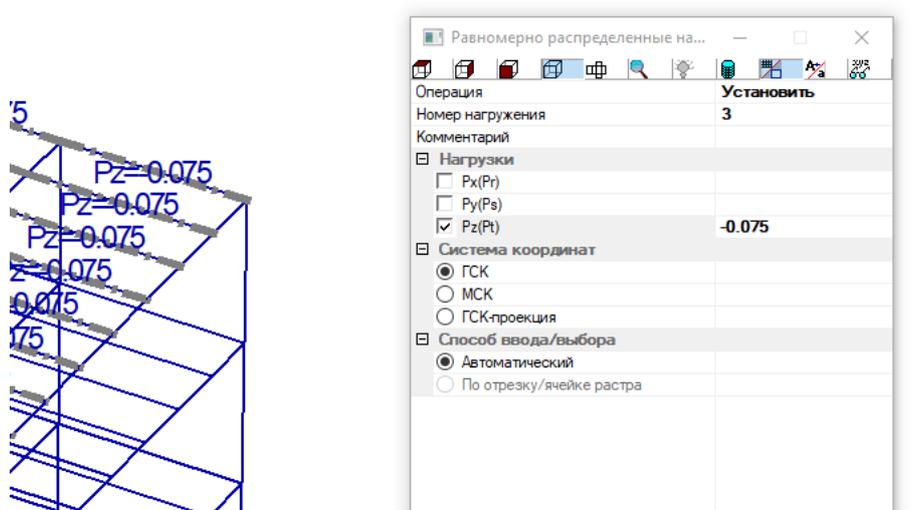


Рис. 4.11. Вес покрытия и кровли

Полезная нагрузка на перекрытие задается вдоль оси z со значением $P_z = 5,65$ тс (рис. 4.12).

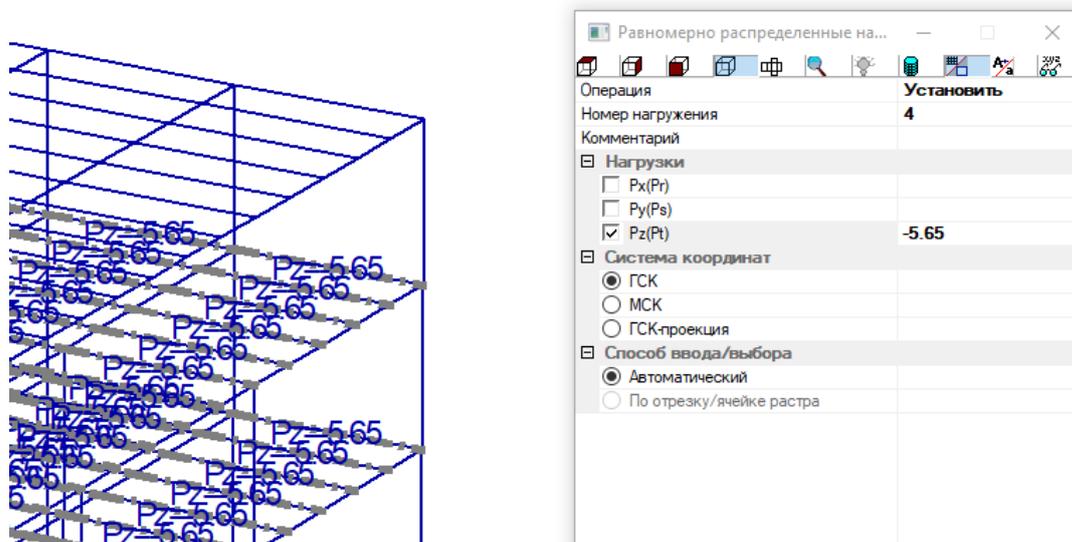


Рис. 4.12. Значение полезной нагрузки на перекрытие

Снеговая нагрузка на покрытие задается вдоль оси z со значением $P_z = 1,41$ тс (рис. 4.13).

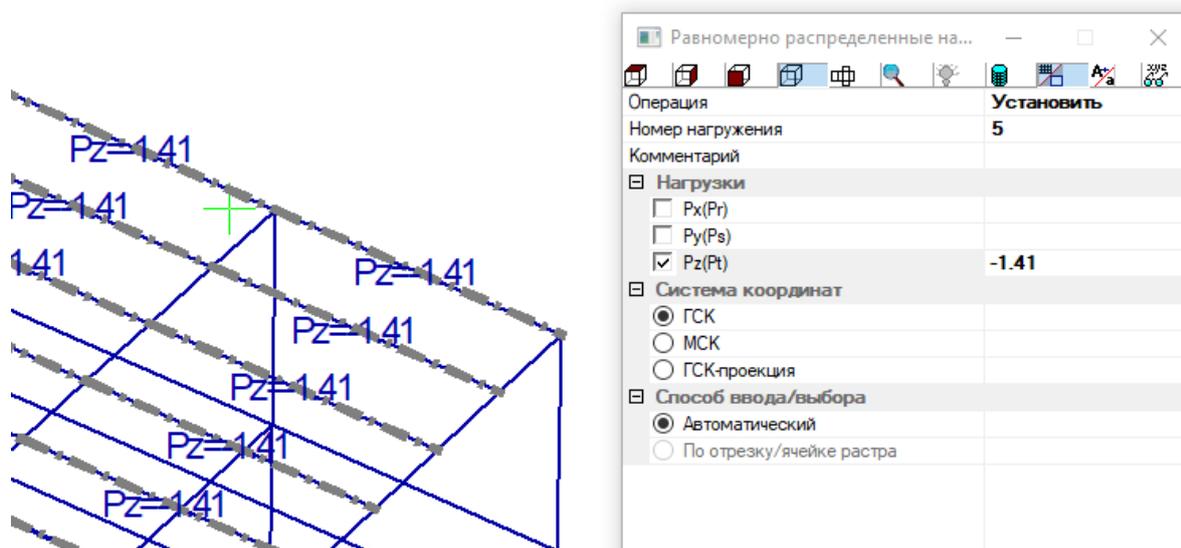


Рис. 4.13. Значения снеговой нагрузки

Ветровая нагрузка задается по короткой (размеры короткой стороны $A = -0,36$; $B = -0,29$; $C = -0,18$; $D = 0,29$ (рис. 4.14) и длинной сторонам здания $A = -0,36$; $B = -0,18$; $C = -0,29$; $D = 0,18$ (рис. 4.15).

В этом режиме выполняется расчет ветровых нагрузок на некоторые из представленных в приложении В СП 20.13330.2016 схем зданий, сооружений и элементов конструкций. Во всех случаях определяется статическое значение ветровой нагрузки, нормальной к поверхности сооружения. Для ввода исходных данных и получения результатов используется двухстраничное диалоговое окно «Ветер».

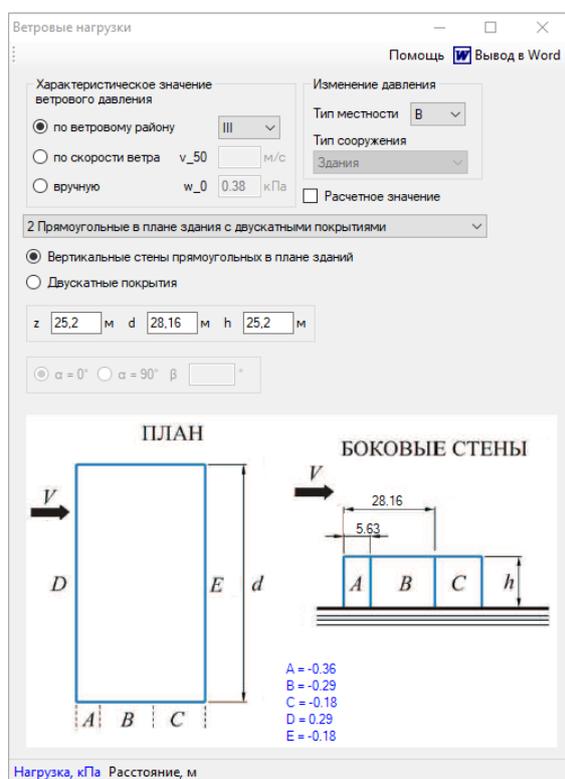


Рис. 4.14. Ветровая нагрузка по короткой стороне

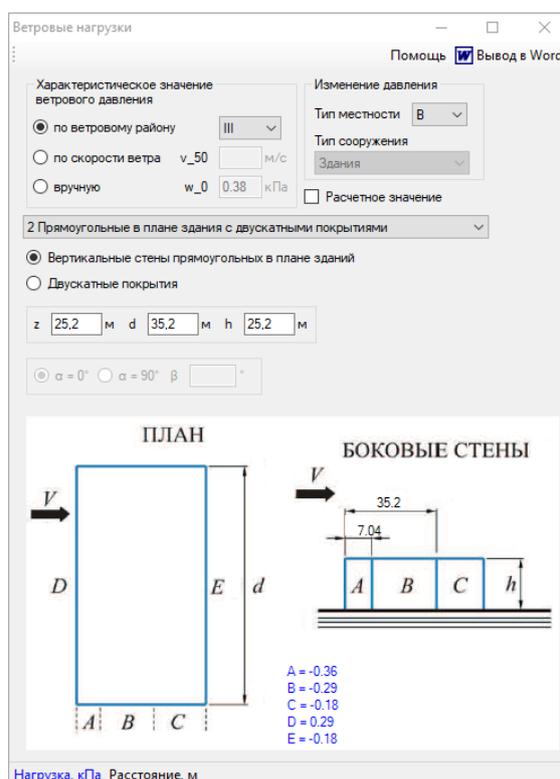


Рис. 4.15. Ветровая нагрузка по длинной стороне

На странице «Вычисление ветровых нагрузок» вводятся значения размеров здания. Из раскрывающегося списка выбирается наименование поверхности (кровля, левая стена, правая стена, боковые стены), для которой следует вычислить значения ветровой нагрузки, а маркером указывается расчетное направление ветра.

Первая страница «Общие сведения» предназначена для ввода информации о типе местности и ветровом районе расположения объекта расчета. В список «Ветровой район» и поля «Нормативное значение ветрового давления» (по СНиП), «Характеристическое значение ветрового давления» (по ДБН) переносятся значения из диалогового окна «Местность» (если в нем была нажата кнопка «Применить»). Однако возможен

и независимый выбор ветрового района из одноименного списка. Если вводится отличное от рекомендаций норм нормативное значение ветрового давления, то наименование ветрового района в списке не указывается.

4.1.7. Выполнение статического расчета

Перед выполнением расчета необходимо сохранить проект. Если при этом появится окно, информирующее о том, что в проекте имеются элементы с незадавленными материалами, то следует вернуться к заданию материалов.

Для выполнения расчета на вкладке «Расчет и результаты» вызываем команду «Расчет МКЭ». Появится окно «Выбор типа расчета», в котором устанавливаем тип расчета – «Статический расчет» и нажимаем кнопку «ОК».

4.1.8. Анализ результатов расчета

Задаем жесткостные характеристики многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов.

Для отображения эпюр усилий необходимо на вкладке «Расчет и результаты» вызвать команду «Эпюры усилий в стержнях».

Результаты продольных усилий N в колоннах представлены на рис. 4.16.

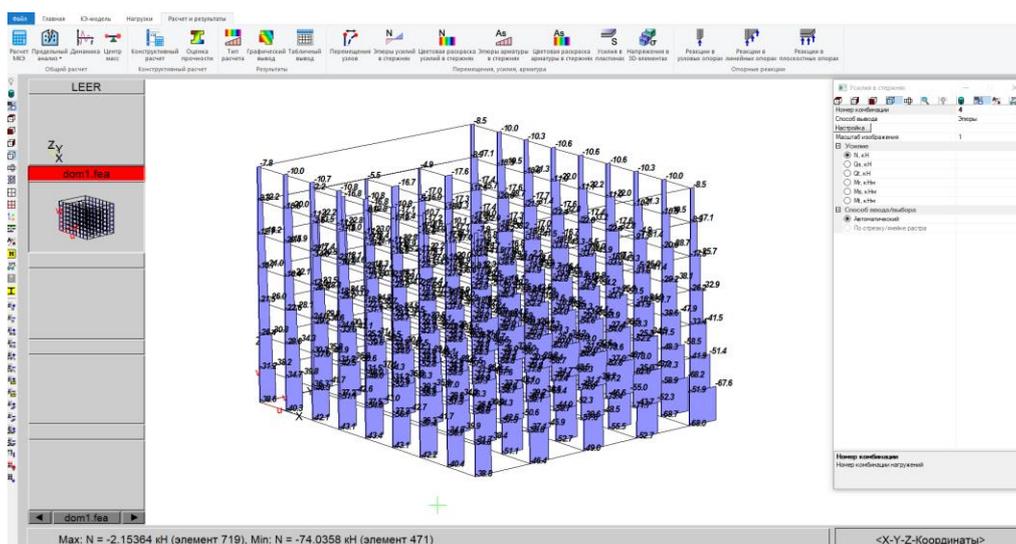


Рис. 4.16. Эпюра N для колонны

Результаты поперечных усилий Q в колоннах представлены на рис. 4.17.

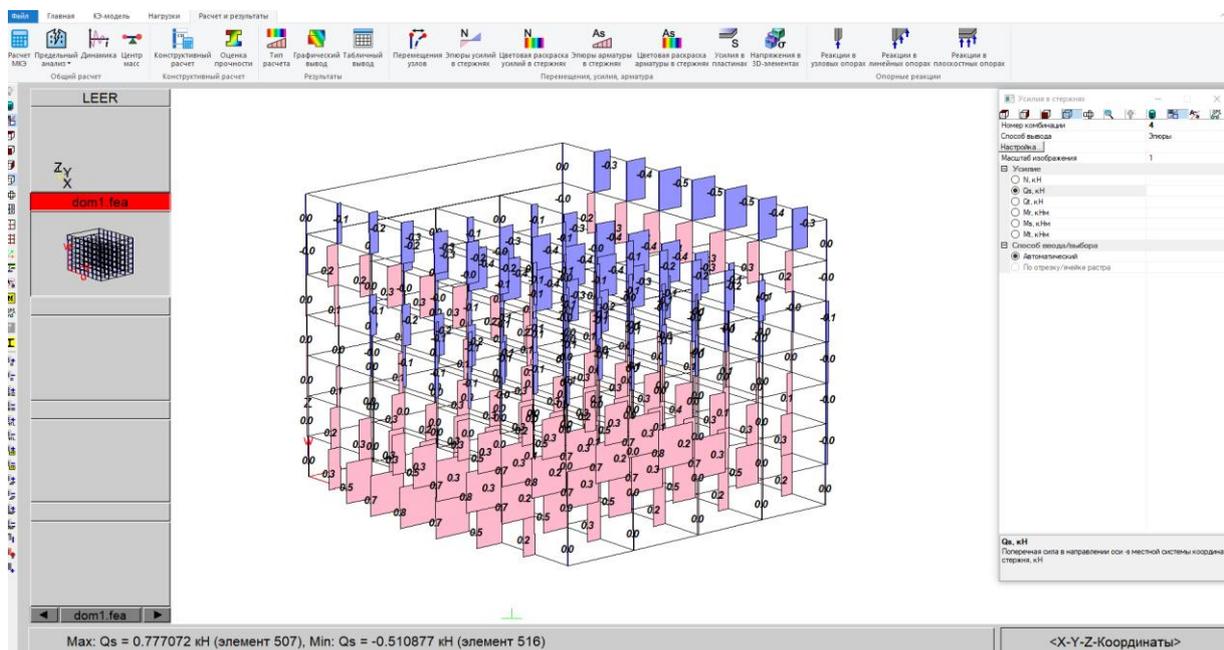


Рис. 4.17. Эпюра Q для колонны

Результаты изгибающих моментов M в колоннах приведены на рис. 4.18.

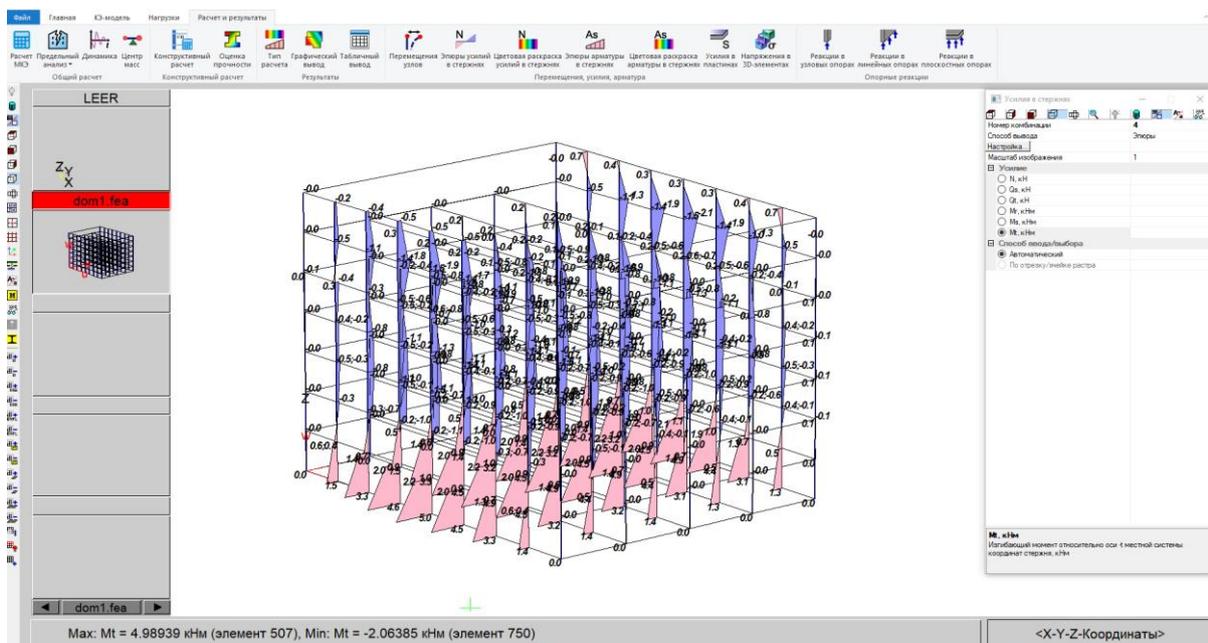


Рис. 4.18. Эпюра M для колонны

Результаты поперечных усилий Q в главной балке показаны на рис. 4.19.

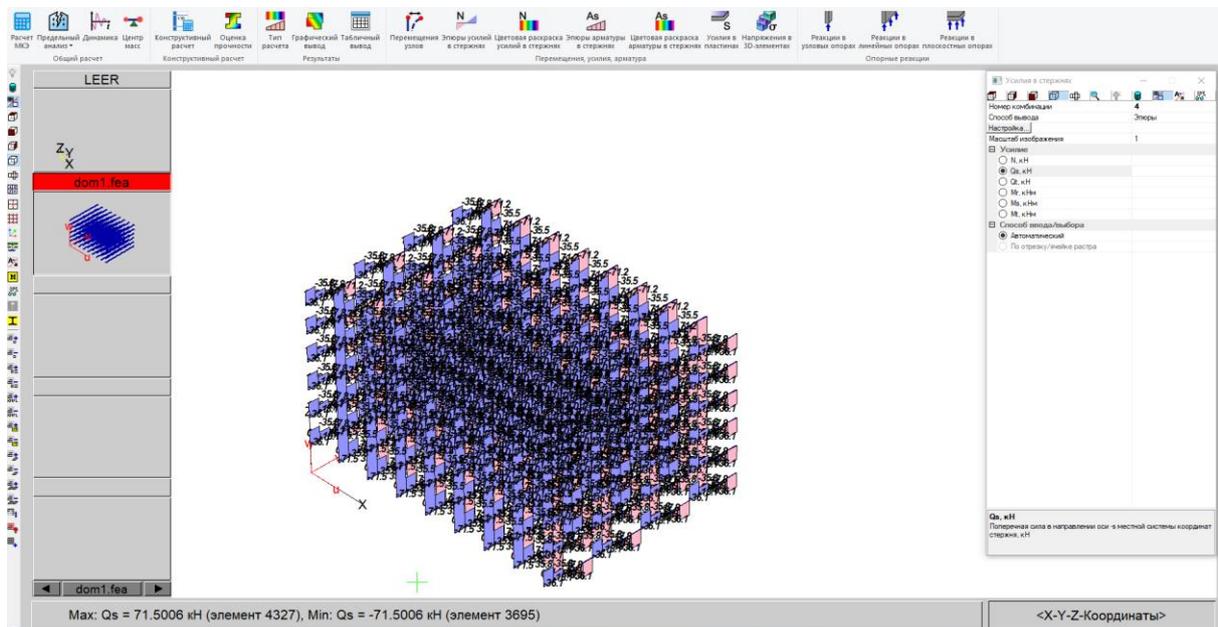


Рис. 4.19. Эпюра Q для главной балки

Результаты изгибающих моментов M в главной балке представлены на рис. 4.20.

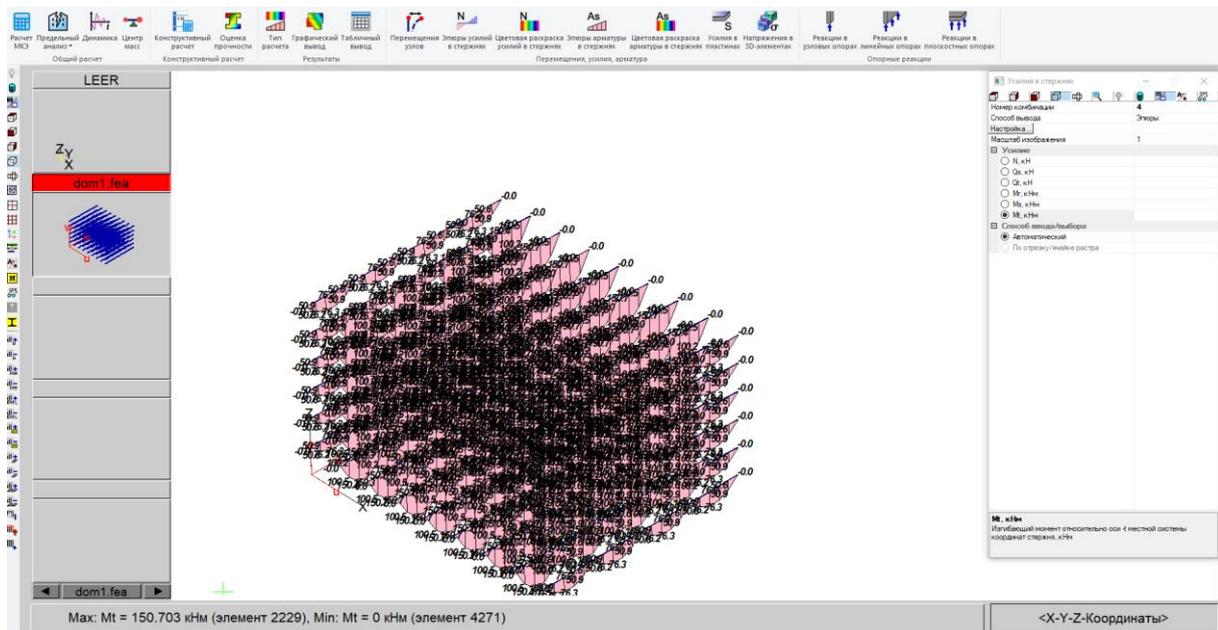


Рис. 4.20. Эпюра M для главной балки

Результаты поперечных усилий Q во второстепенной балке приведены на рис. 4.21.

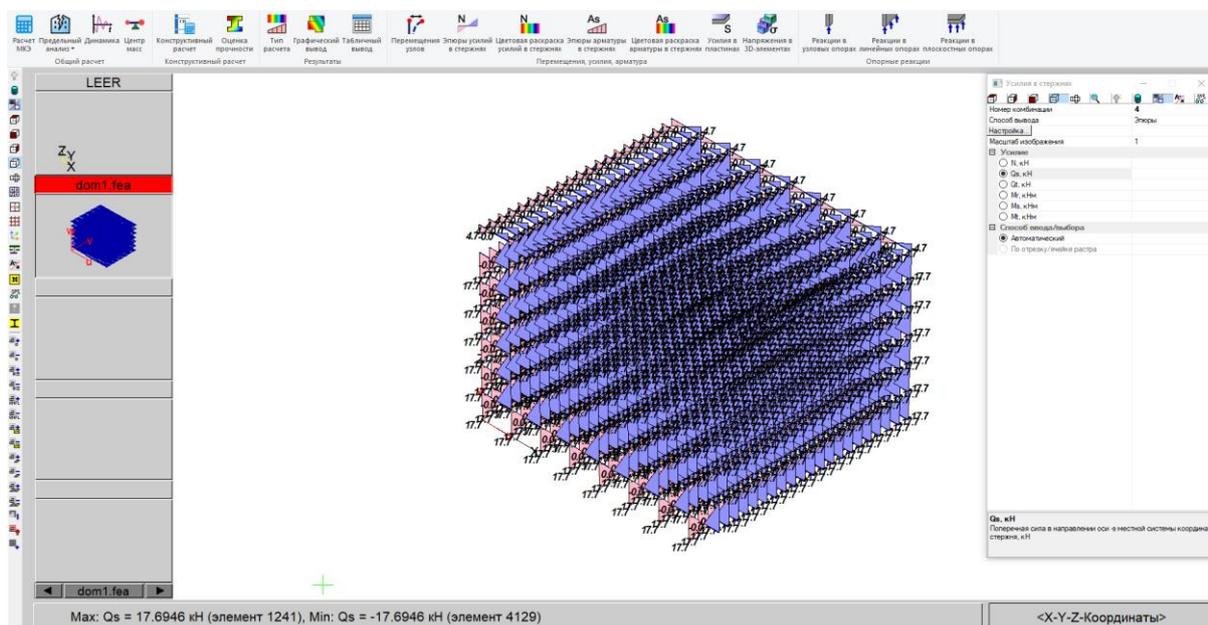


Рис. 4.21. Эпюра Q для второстепенной балки

Результаты изгибающих моментов M во второстепенной балке можно видеть на рис. 4.22.

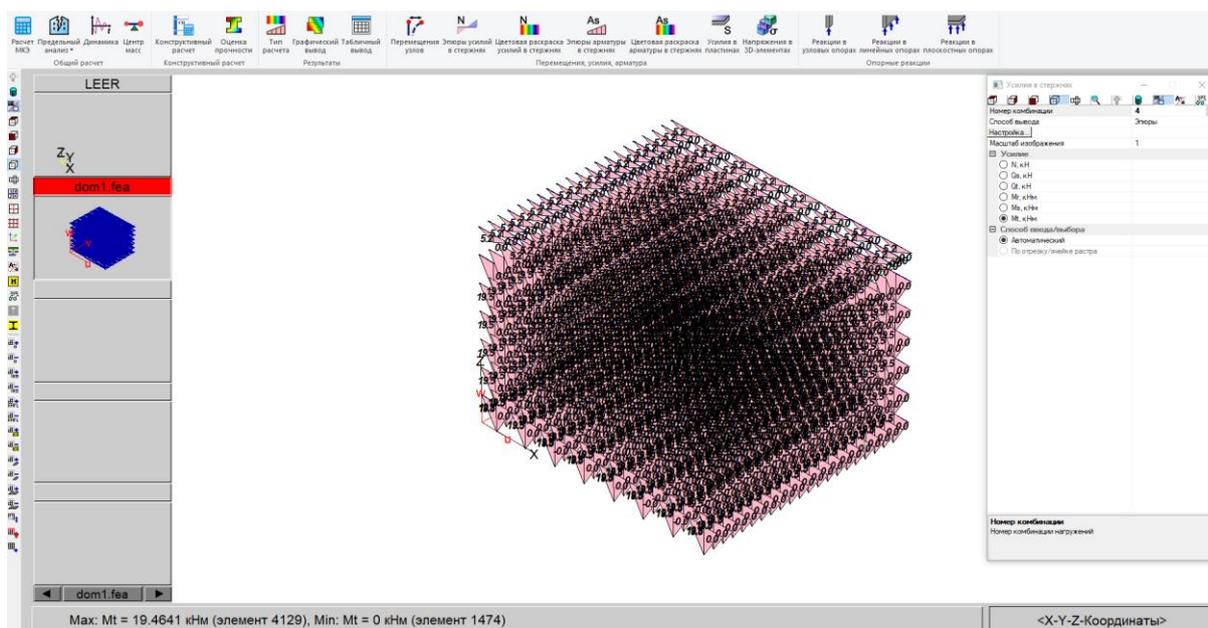


Рис. 4.22. Эпюра M для второстепенной балки

Результаты поперечных усилий Q в стропильной балке представлены на рис. 4.23.

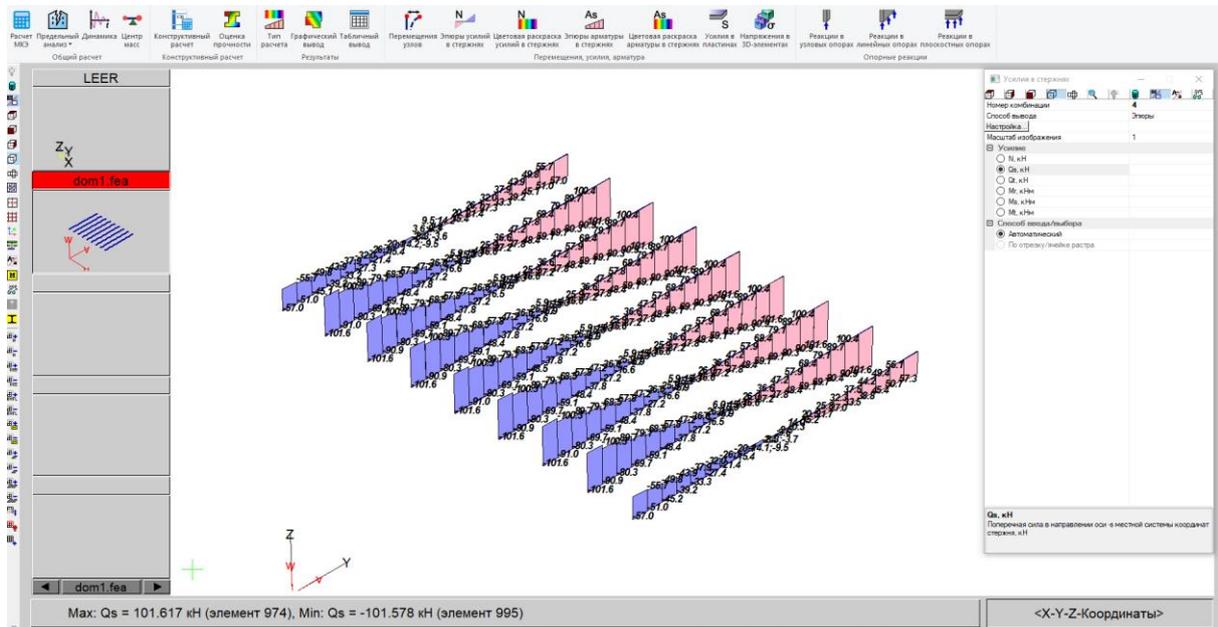


Рис. 4.23. Эпюры Q для стропильной балки

Результаты изгибающих моментов M в стропильной балке даны на рис. 4.24.

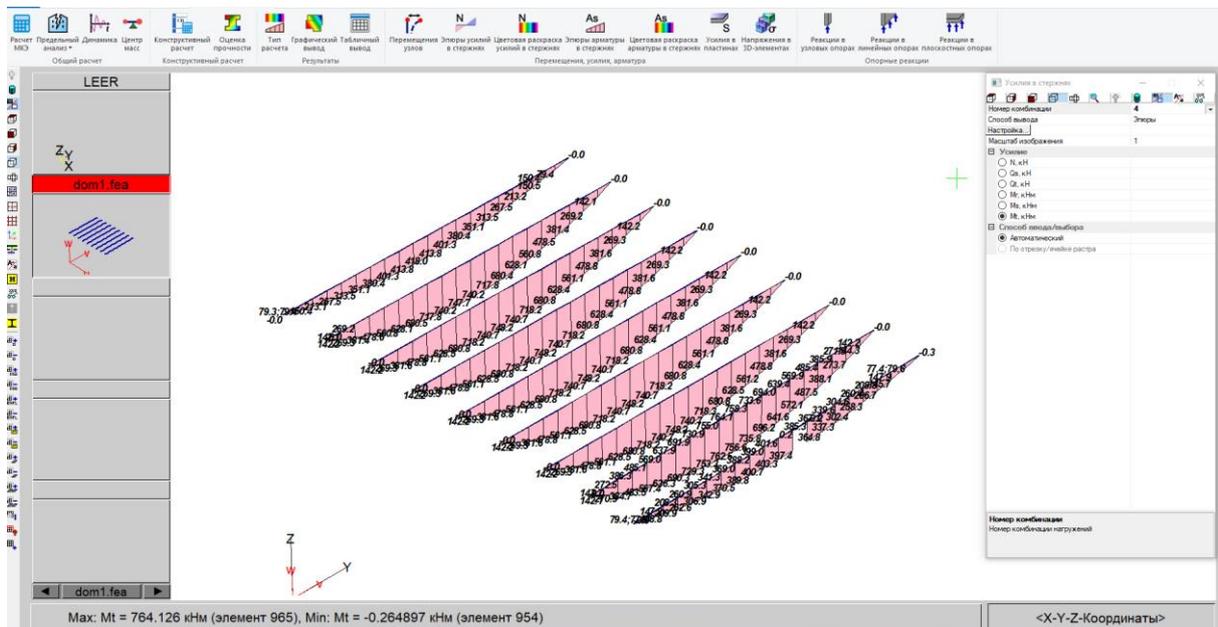


Рис. 4.24. Эпюры M для стропильной балки

По результатам расчета максимальный изгибающий момент в стропильной балке составил 764,13 кН · м, поперечная сила – 0,77 кН. Во второстепенной балке максимальный изгибающий момент равен 19,46 кН · м, поперечная сила составила 17,7 кН. Изгибающий момент для колонн составил 4,98 кН · м, поперечная сила 0,77 кН, продольная сила 74,04 кН.

4.2. Разработка модели каркаса многоэтажного деревокомпозитного здания в программном комплексе ПК SCAD

4.2.1. Запуск программы SCAD и подготовка к созданию расчетной схемы

Запустите программу SCAD (ярлык программы 2ЛКМ или Пуск → Программы → SCAD Office → SCAD).

Создайте «Новый проект», установив курсор на одноименной кнопке «Создать новый проект» инструментальной панели, и нажмите ЛКМ или верхнее меню «Проект → Новый проект».

Введите поле «Наименование», например «Работа1», введите поле «Организация», а также поле «Объект», например каркас.

Нажмите кнопку «Единицы измерения», установите необходимые единицы измерения основных величин. Поставьте галочку напротив «Использовать по умолчанию». Установите три знака после запятой. Нажмите кнопку «ОК».

Выбор типа схемы. В типе схемы просмотрите предлагаемые варианты (1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11). Выберите тип схемы 4 – Пространственная шарнирно-стержневая система. Нажмите кнопку «ОК».

Создание нового проекта SCAD. Задайте имя файла нового проекта, например Занятие № 2.spr, нажмите кнопку «ОК». Все файлы проектов сохраняются в папку SDATA.

Появилось окно «Дерево проекта». Дерево проекта включает четыре раздела первого уровня:

- исходные данные;
- расчет;
- результаты;
- конструирование.

Нажмите ЛКМ на «Расчетная схема». В результате откроется рабочее окно по созданию расчетной схемы, в котором имеется шесть

функциональных разделов: Управление, Схема, Назначение, Узлы и элементы, Загрузки, Группы.

4.2.2. Исходные данные для расчета

Район строительства г. Санкт-Петербург. Пролет 4 м. Количество этажей 5. Шаг поперечных рам здания 3,2 м. Класс арматуры А400. Дополнительные данные: количество пролетов 4, количество шагов 5.

В ПК SCAD строим модель каркаса многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов.

Компоновочная схема каркаса многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов, показана на рис. 4.25.

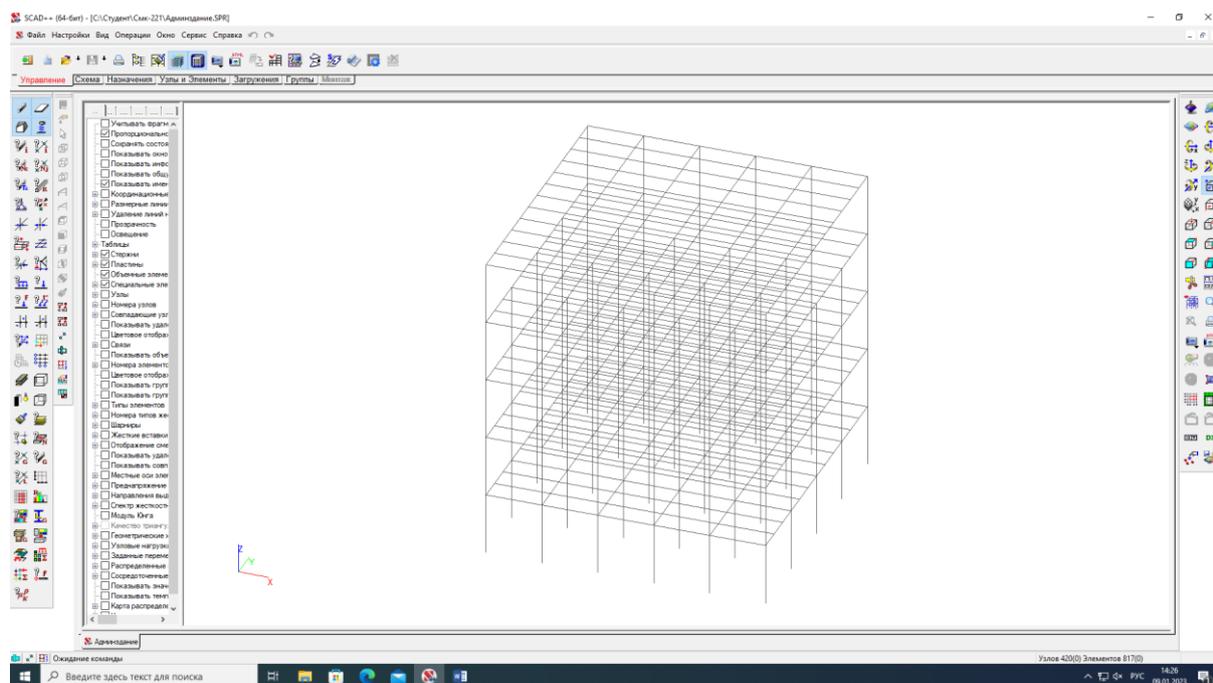


Рис. 4.25. Общий вид многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов

4.2.3. Жесткостные характеристики

Поскольку в программе SCAD для расчета любых стержневых систем как статически определимых, так и статически неопределимых применяется МКЭ, в котором используются матрицы жесткости элементов, то жесткости элементов должны быть заданы и при расчете

статически определимых стержневых систем. Если ставится задача определения только усилий в рассматриваемой статически определенной стержневой системе, то с учетом того, что жесткости не входят в уравнения равновесия, требуемые жесткости в программе SCAD могут быть заданы в виде произвольных значений, например равными единице. При решении задачи об определении перемещений в статически определимых стержневых системах и при расчете статически неопределимых стержневых систем необходимо задание реальной жесткости стержней или их соотношений.

Задание жесткости каркаса многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов, имеет спектр жесткости (рис. 4.26, 4.27).

Нажмите закладку «Назначения → Назначение жесткостей стержням».

Задаем жесткостные характеристики для элементов многоэтажного здания: колонн, главных балок, второстепенных балок, стропильных балок (рис. 4.26).

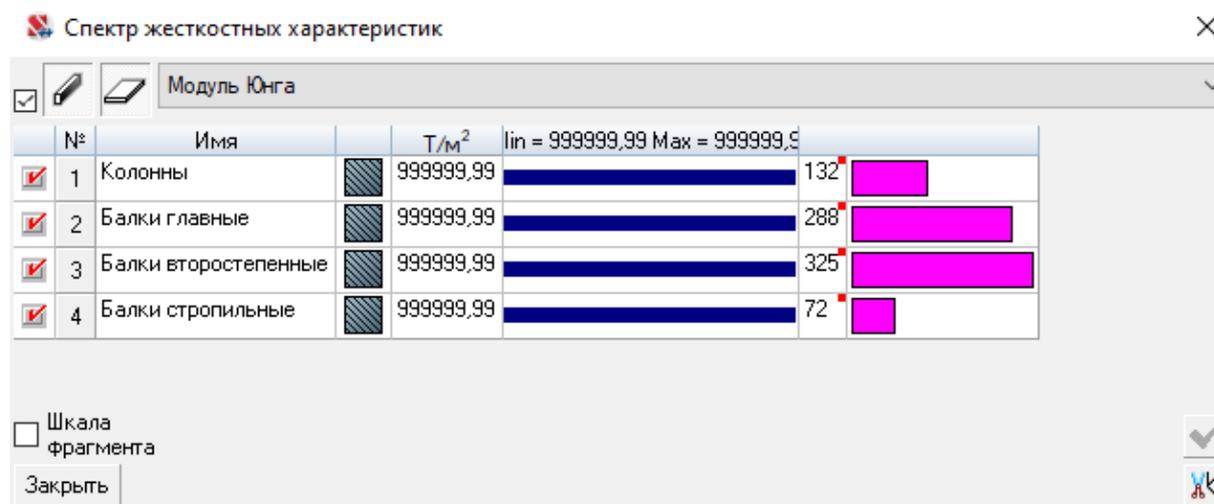


Рис. 4.26. Спектр жесткостных характеристик многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов

Производим назначения жесткостных характеристик на каркас здания (рис. 4.27).

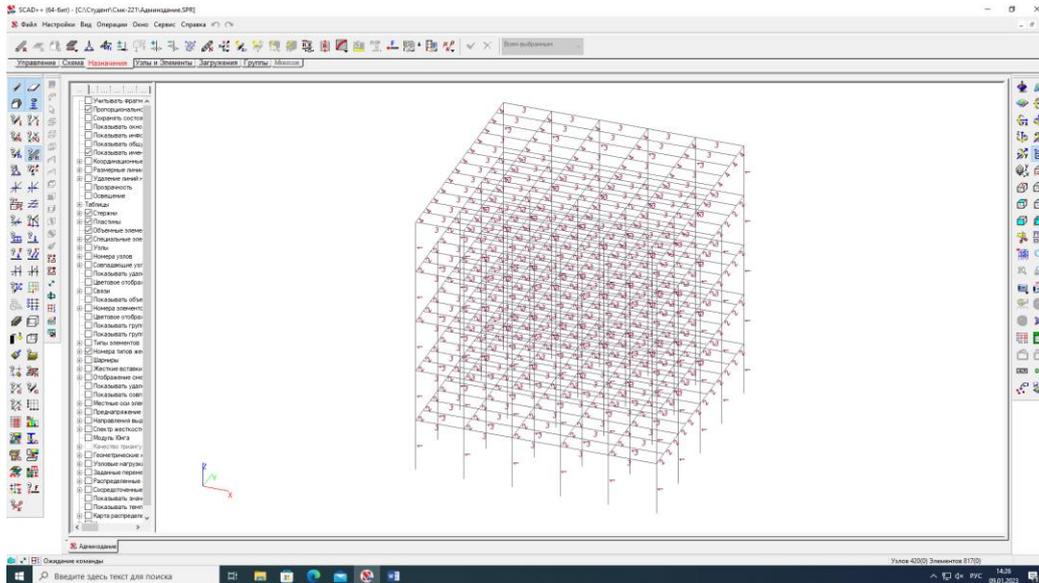


Рис. 4.27. Жесткостные характеристики здания

4.2.4. Сечение элементов несущих конструкций

Задание параметров сечения стержневых элементов для многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов, показано на рис. 4.28.

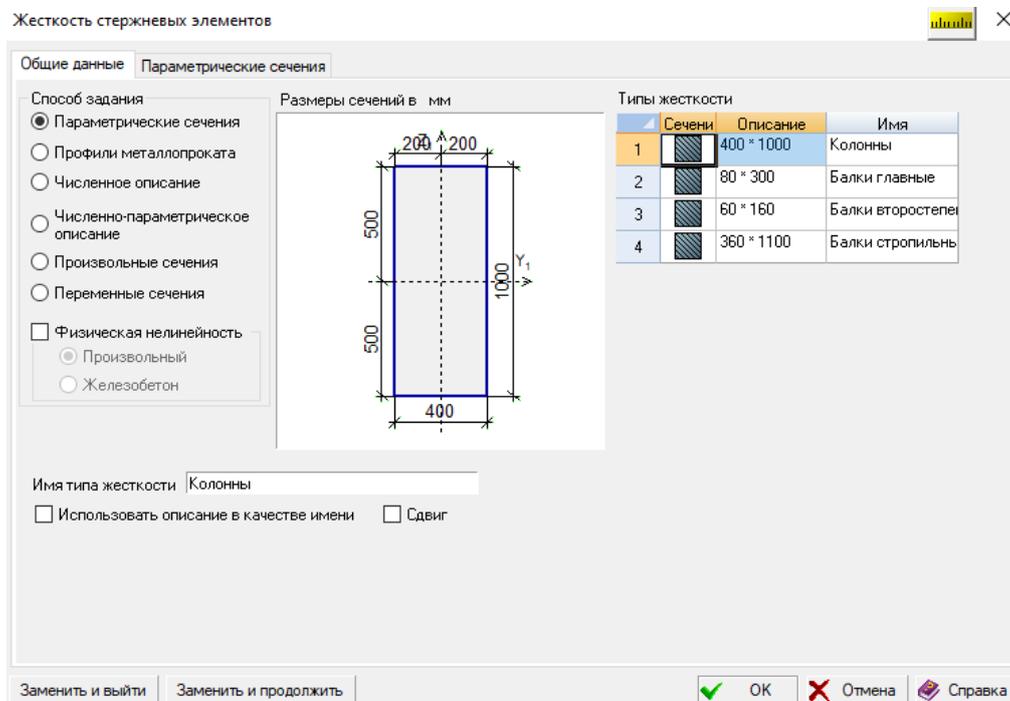


Рис. 4.28. Размеры сечений колонны из армированных клееных деревянных элементов

Задание размеров для сечения главной балки (рис. 4.29).

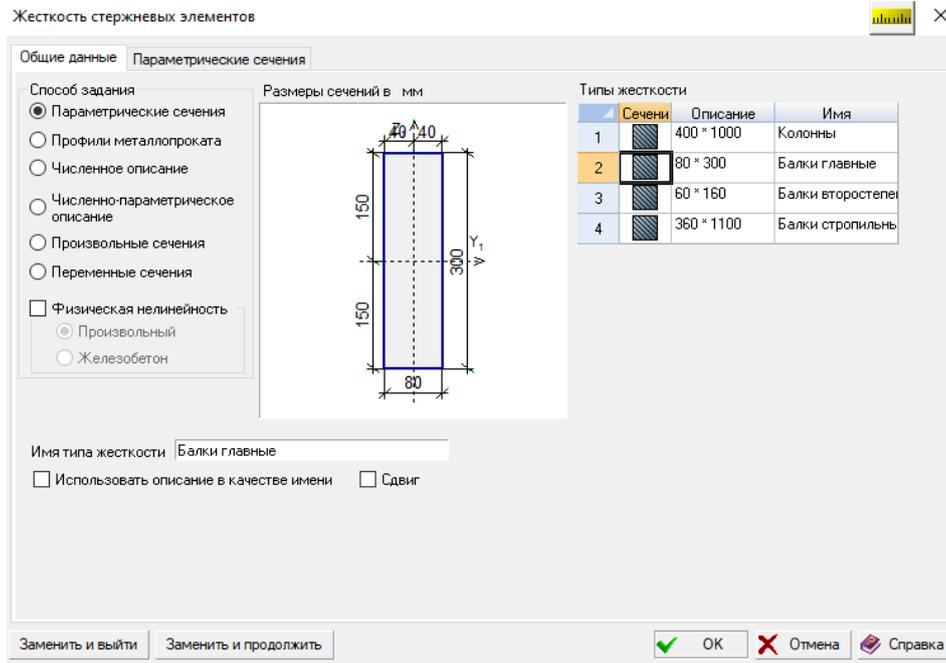


Рис. 4.29. Размеры сечений главной балки из армированных клееных деревянных элементов

Задание размеров сечения второстепенной балки (рис. 4.30).

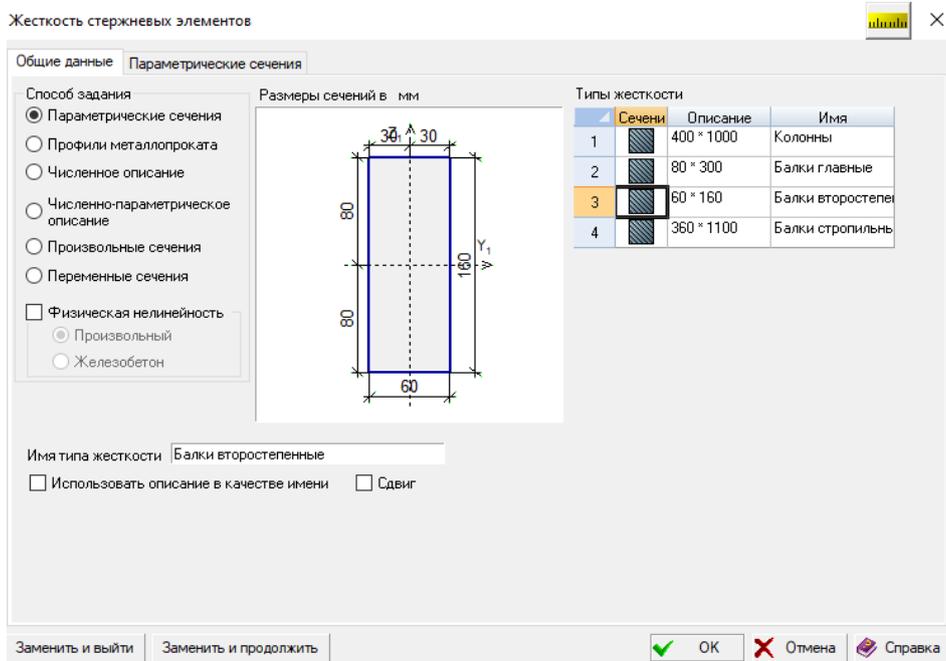


Рис. 4.30. Размеры сечений второстепенной балки из армированных клееных деревянных элементов

Задание размеров сечения стропильной балки из армированных клееных деревянных элементов (рис. 4.31).

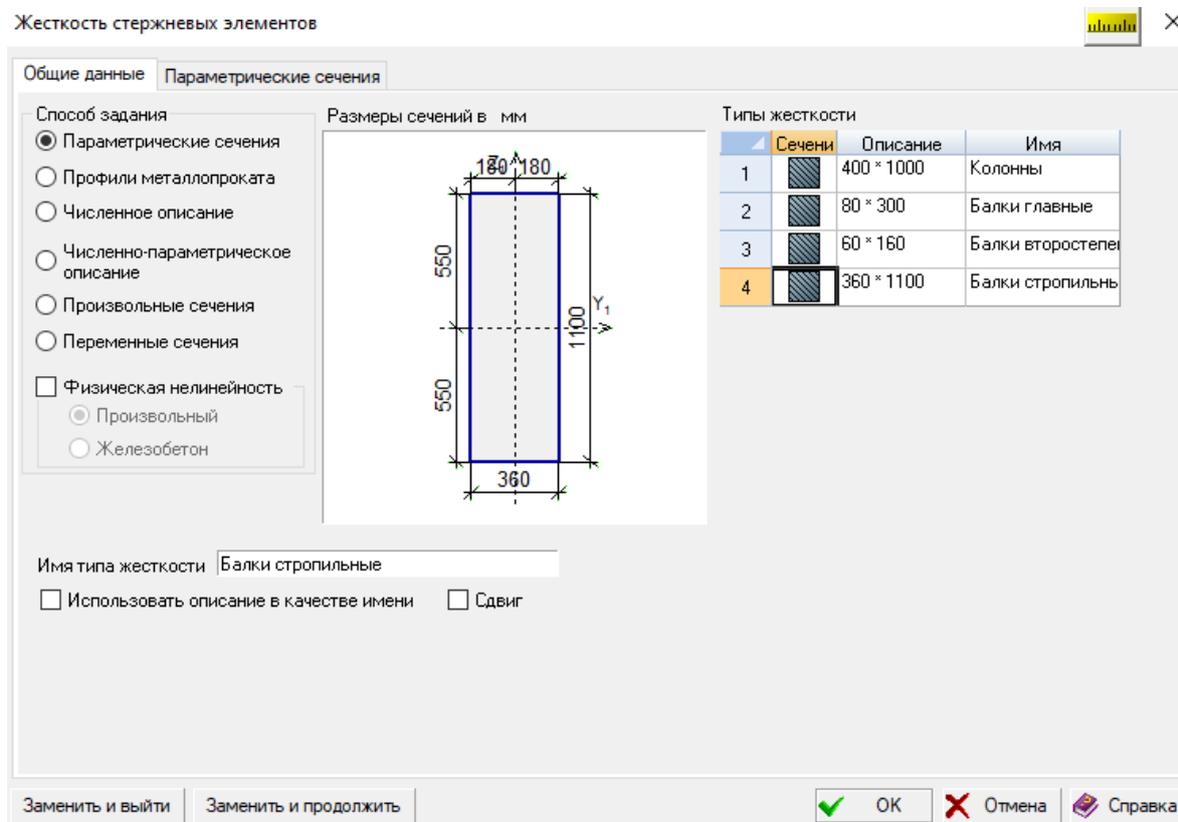


Рис. 4.31. Размеры сечений стропильной балки из армированных клееных деревянных элементов

4.2.5. Назначение опорных связей и шарниров в узлах элементов

Стержневая система часто опирается на основание, которое считается жестким. В этом случае в узел, который присоединяется к жесткому основанию, вводятся жесткие связи.

В общей системе осей координат связи X , Y , Z означают закрепление узла в направлении одноименных осей общей системы координат. Связи UX , UY , UZ означают закрепление узла от поворотов относительно указанных осей общей системы координат.

Шарниры устанавливаются в местах сопряжения колонны и главной балки, главной балки и второстепенной балки. Эти шарниры, по сути, означают, что в месте их установки удалена связь, мешающая сечению элемента, соединенному с узлом, поворачиваться вокруг оси Y (рис. 4.32).

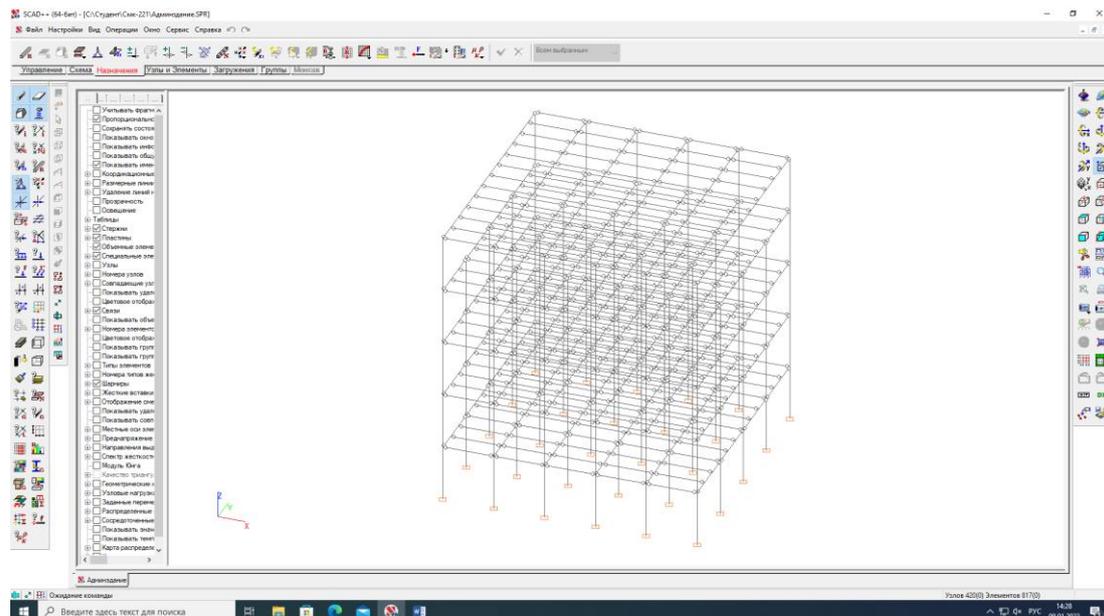


Рис. 4.32. Опорные связи и шарниры в узлах элементов

4.2.6. Загрузка расчетной схемы

Задание собственного веса на пространственный каркас дерево-композитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Собственный вес». Появится диалоговое окно «Собственный вес» и нажмите «ОК» (рис. 4.33).

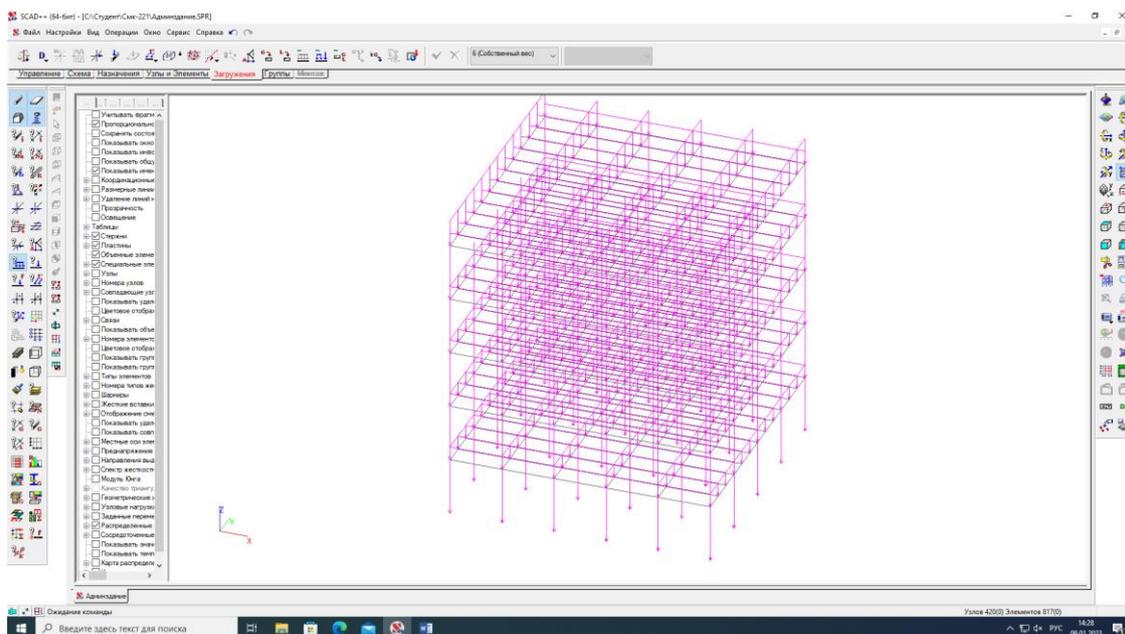


Рис. 4.33. Собственный вес

Задание собственного веса на пространственный каркас деревокомпозитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Собственный вес». Появится диалоговое окно «Собственный вес» и нажмите «ОК» (рис. 4.34).

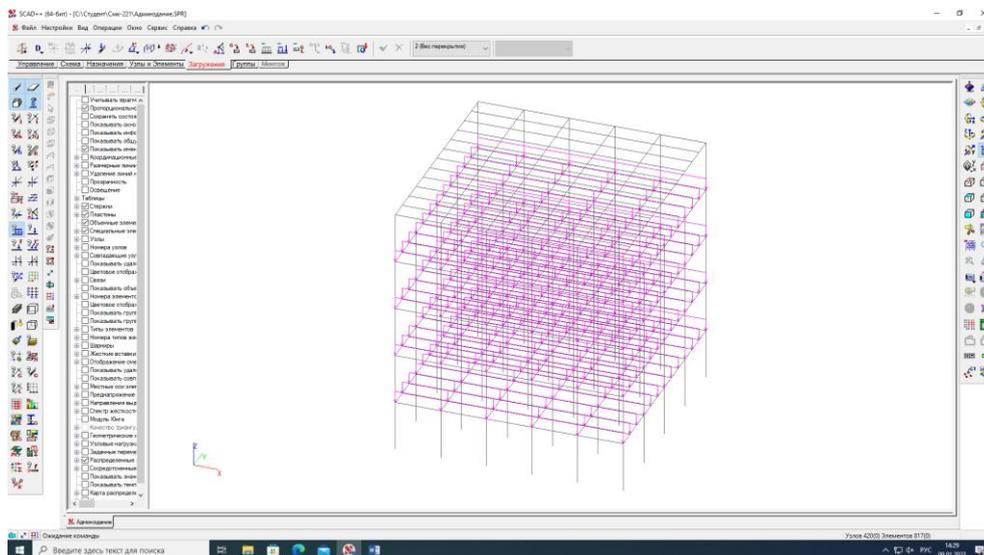


Рис. 4.34. Постоянная нагрузка на перекрытие

Задание веса покрытия и кровли на пространственный каркас деревокомпозитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Нагрузки на стержень». Появится диалоговое окно, в которое нужно добавить значение нагружения, и нажмите «ОК» (рис. 4.35).

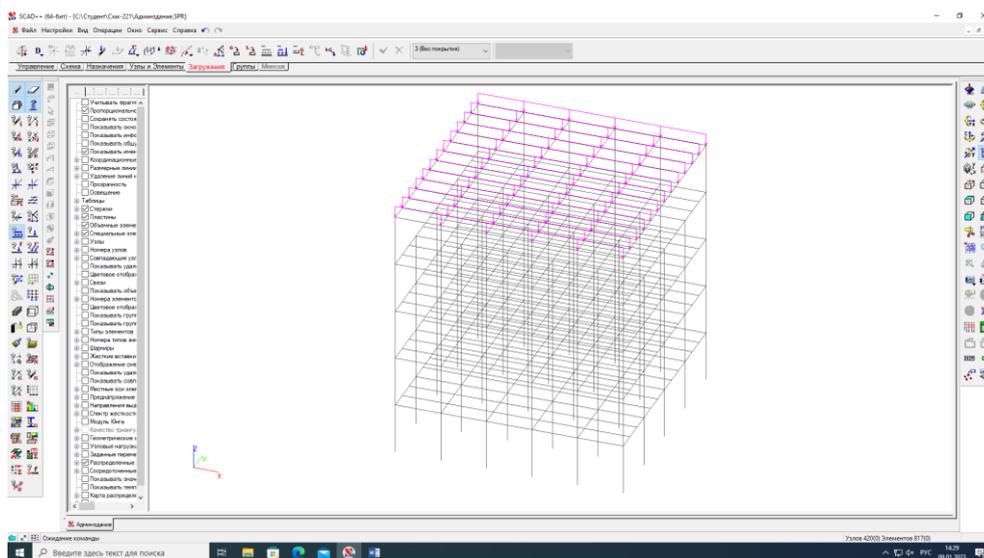


Рис. 4.35. Вес покрытия и кровли

Задание веса перекрытия на пространственный каркас дерево-композитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Нагрузки на стержень». Появится диалоговое окно, в которое нужно добавить значение нагружения, и нажмите «ОК» (рис. 4.36).

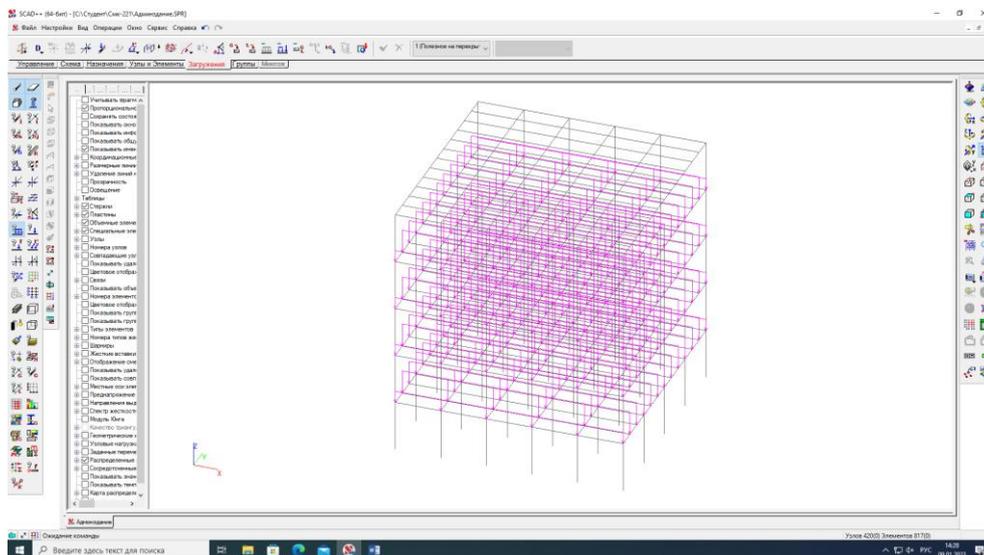


Рис. 4.36. Полезная нагрузка на перекрытие

Задание ветровой нагрузки на пространственный каркас дерево-композитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Ветровая нагрузка». Появится диалоговое окно, в которое нужно добавить значение нагружения, и нажмите «ОК» (рис. 4.37).

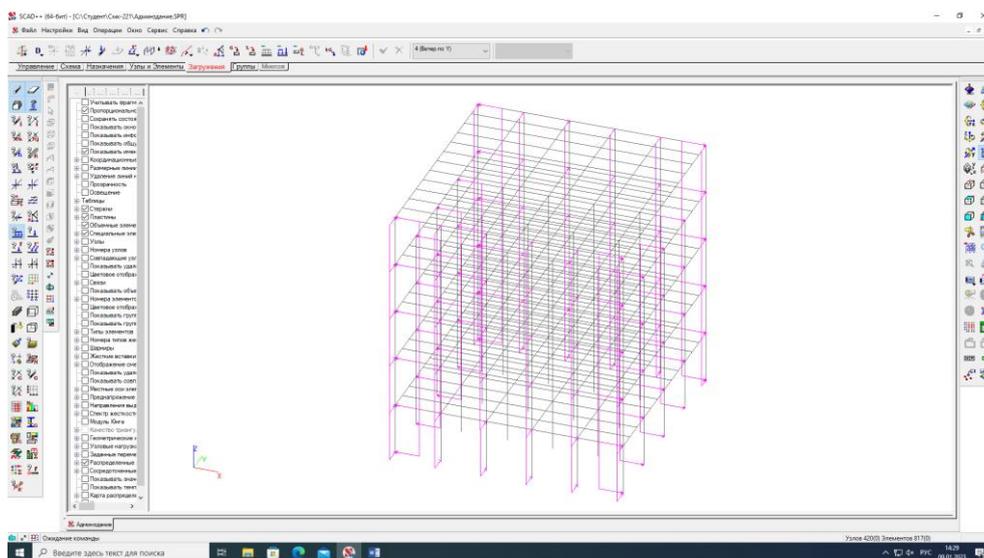


Рис. 4.37. Ветровая нагрузка

Задание ветровой нагрузки на пространственный каркас дерево-композитного здания. Зайдите в закладку «Загрузки». Нажмите кнопку «Ветровая нагрузка». Появится диалоговое окно, в которое нужно добавить значение нагружения, и нажмите «ОК» (рис. 4.38, 4.39).

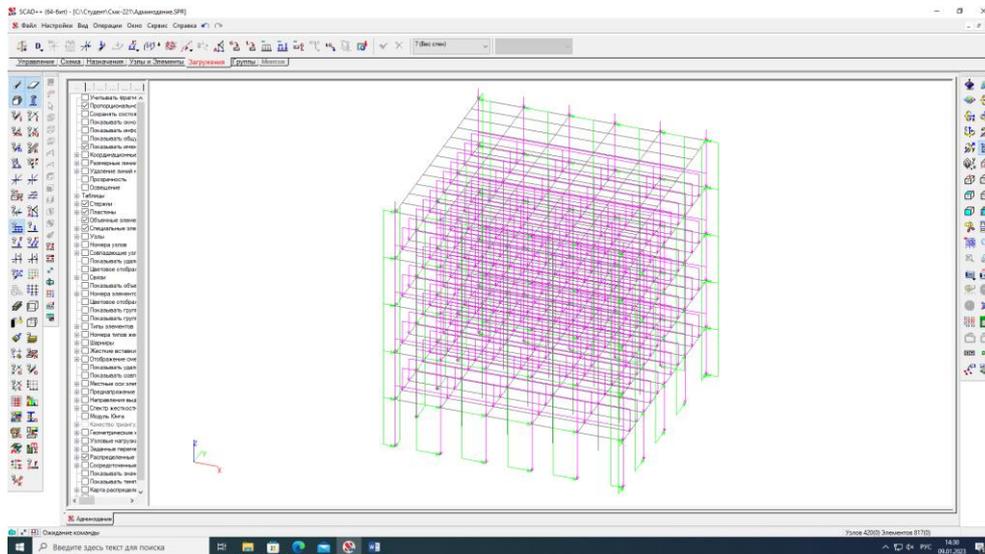


Рис. 4.38. Нагрузки на стены

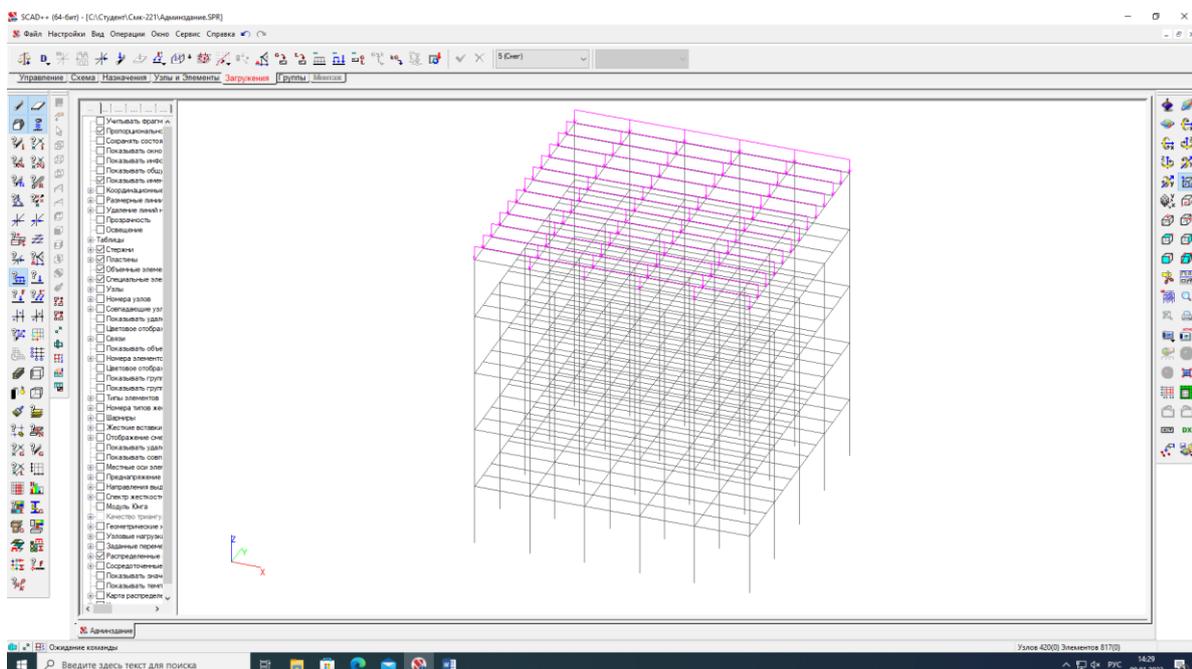


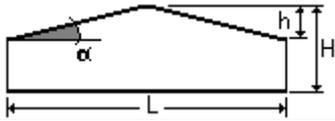
Рис. 4.39. Снеговая нагрузка

В дереве проекта в группе функций «Расчет» выбираем «Линейный». После этого нажимаем кнопку «Выход», что приведет к появлению окна с деревом проекта, в котором становится доступным раздел «Результаты».

Расчет снеговой нагрузки выполнен по нормам проектирования СП 20.13330.2016 с изменениями № 1, 2 и представлен в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Отчет по снеговой нагрузке сформирован в программе ВеСТ

Параметр	Значение	Единица измерения
Местность		
Снеговой район	III	–
Нормативное значение снеговой нагрузки	0,153	Т/м ²
Тип местности	В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м	
Средняя температура января	–10	°С
Здание		
		
Высота здания H	18	м
Ширина здания B	16	м
<i>h</i>	1,555	м
α	11	град
<i>L</i>	16	м
Неутепленная конструкция с повышенным тепловыделением	Нет	
Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	1,4	

Расчет ветровой нагрузки выполнен по нормам проектирования СП 20.13330.2016 с изменениями № 1, 2 и представлен в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Отчет по ветровой нагрузке сформирован в программе ВеСТ

Исходные данные		
Ветровой район	II	
Нормативное значение ветрового давления	0,03 Т/м ²	
Тип местности	А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра	
Тип сооружения	Здания с открывающимися и постоянно открытыми проемами	
Параметры		
Поверхность	Наветренная стена (D)	
Шаг сканирования	3,6 м	
Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	1,4	
Высота здания Н	18 м	
Шаг рамы В	16 м	
Пролет L	16 м	
Проницаемость ограждения	0 %	
Проницаемая сторона: наветренная стена		
Высота, м	Нормативное значение, Т/м ²	Расчетное значение, Т/м ²
0	0,035	0,048
3,6	0,036	0,051
7,2	0,037	0,051
10,8	0,037	0,051
14,4	0,037	0,051
18	0,037	0,051

4.2.7. Комбинация загружений и расчетные сочетания усилий

Необходимо определить расчетные сочетания, т. е. найти те сочетания отдельных загружений, которые могут быть решающими (наиболее опасными) для каждого:

- проверяемого элемента;
- сечения элемента для стержней;
- узла.

При этом выбираются невыгодные сочетания усилий, которые создают максимальные упругие напряжения в характерных точках или на характерных площадках конечных элементов. Для конечных элементов различного типа (стержневых, пластинчатых и т. п.) используется свой подход для назначения критериев выбора расчетного сочетания усилий. Аналогично подбираются сочетания для максимального перемещения узлов.

Программа SCAD определяет сочетания как расчетного, так и нормативного напряженно-деформируемого состояния (НДС). Для найденных невыгодных по тому или иному критерию комбинаций расчетных значений вычисляются длительные, а также нормативные и нормативные длительные значения соответствующих усилий, напряжений и перемещений. Так как нормы проектирования регламентируют ограничения нормативных значений перемещений, то для каждого узла вычисляются только нормативные и нормативные длительные сочетания перемещений.

Загружения, действующие на рассчитываемый объект, могут принадлежать в зависимости от продолжительности действия нагрузок к одному из следующих типов (согласно классификации СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», п. 5):

- постоянные;
- длительные;
- кратковременные;
- особые.

При определении расчетных сочетаний учитываются логические связи между загружениями, отражающими их физический смысл, и требования, регламентируемые различными нормативными документами.

Расчетные сочетания усилий:

1. Постоянная + длительная.

2. Постоянная + длительная + снег.
3. Постоянная + длительная + снег + ветер.
4. Постоянная + длительная + снег + ветер (другое).

Собираем расчетные усилия из наиболее невыгодной комбинации расчетных значений, которые создают максимальные упругие напряжения в характерных точках или на характерных площадках конечных элементов (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Расчетные усилия

№ п/п	Тип элемента	Расчетные усилия		
		M , т·м	Q , т	N , т
1	Колонна 1-го этажа	9,31	1,26	54,46
	Колонна 2-го этажа	5,91	1,02	40,85
	Колонна 3-го этажа	3,41	0,85	27,23
	Колонна 4-го этажа	1,51	0,58	18,1
	Колонна 5-го этажа	0,93	0,48	10,1
2	Стропильная балка	32,27	7,54	-
3	Главная балка перекрытия	5,7	4,28	-
4	Второстепенная балка	1,7	2,13	-

4.2.8. Анализ результатов расчета

По результатам полученных усилий из табл. 4.5 принимаем следующие сечения и армирование конструкций:

- в качестве второстепенной балки берем клееный брус сечением $80 \times 226(h)$ мм, армированный $2\varnothing 18$ А500. Процент армирования 1,5 %;
- в качестве стропильной балки берем двускатный клееный брус толщиной 80 мм, высотой на опоре 226 мм, армированный $10\varnothing 40$ А500;
- в качестве главной балки берем клееный брус сечением $150 \times 430(h)$ мм, армированный $2\varnothing 12$ А500. Процент армирования 2 %;
- в качестве колонны нижнего яруса берем клееный брус сечением $300 \times 700(h)$ мм, армированный $4\varnothing 12$ А500. Процент армирования 1,5 %.

4.3. Численное моделирование деревокомпозитной балочной конструкции в программном комплексе ЛИРА 10.10

Деревокомпозитные балки характеризуются сложным напряженно-деформированным состоянием. Анизотропия древесины усложняет численные исследования [21].

Наиболее известным численным методом, позволяющим изучать сложное напряженно-деформированное состояние сочетаний анизотропных тел, является метод конечных элементов, основанный на дроблении сложных с точки зрения анализа объектов на конечное число базовых элементов. Таким образом, если в первоначальном объекте как в области присутствует некая непрерывная изменяющаяся величина (например, внутренние усилия или напряжения в древесине), то она аппроксимируется до множества кусочно-непрерывных функций, которые определяются границами базовых конечных элементов. Кусочно-непрерывные функции строятся с помощью значений непрерывной величины в узлах соединения элементов.

Если непрерывная величина определена в двух- или трехмерной области, то область обычно разбивается на элементы в форме треугольников или четырехугольников, позволяя исследовать тела любой формы. Аппроксимирующие функции в этом случае изображаются плоскими или криволинейными поверхностями, что позволяет учитывать различные граничные условия расчета. Учитывая тот факт, что описания функций в соседних элементах аппроксимации могут быть различны, с помощью метода конечных элементов можно исследовать конструкции, состоящие из разных, в том числе анизотропных материалов.

Произведено моделирование деревянной балки, армированной тканью по внешнему контуру в зоне растяжения; балка длиной 4,5 м с шарнирным опиранием на равномерно-распределенную нагрузку. По результатам расчетов построены изополя напряжений в массиве древесины.

В программном комплексе ЛИРА 10.10 возможно создание новой задачи расчета пространственной конструкции с шестью степенями свободы в узлах и геометрической исходной схемы объекта исследования. В зависимости от пролета и поперечного сечения балочной конструкции подбираются параметры вспомогательной сетки построения (рис. 4.40).



Рис. 4.40. Создание геометрической схемы

Чтобы изменить параметры вспомогательной сетки, необходимо перейти в пункт «Сеть построения» и выбрать прямоугольную сеть с шагом сетки, соответствующей геометрии горизонтальной проекции балки (рис. 4.41).

Квадратная	Полярная	Прямоугольная	<i>Центр</i>	
	X`	Y`	Хо	0 м
Шаг	4.5	0.2	Yo	0 м
Количество	1	1	Zo	0 м
Угол	0	°	Перенести в начало координат	
<input checked="" type="radio"/> XOY <input type="radio"/> XOZ <input type="radio"/> YOZ <input type="radio"/> XYZ				

Рис. 4.41. Редактирование контура геометрической сетки

Выполнение триангуляции заданного контура – разбиение продольного сечения на трех- и четырехузловые плоские элементы с наименьшим шагом с целью обеспечения максимальной точности выполнения расчета – показано на рис. 4.42, 4.43.

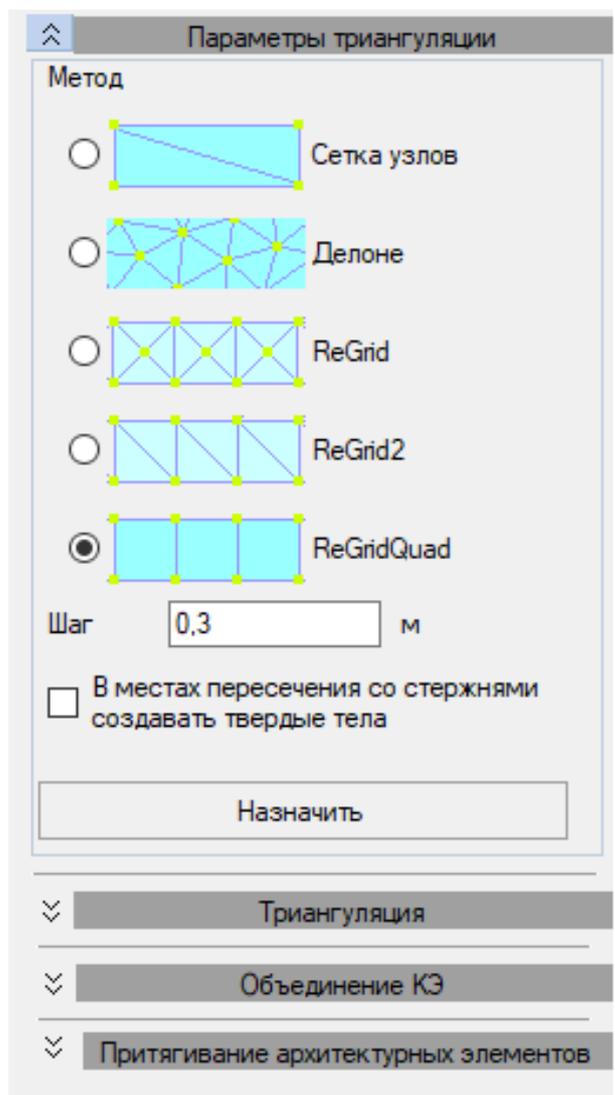


Рис. 4.42. Задание параметра триангуляции

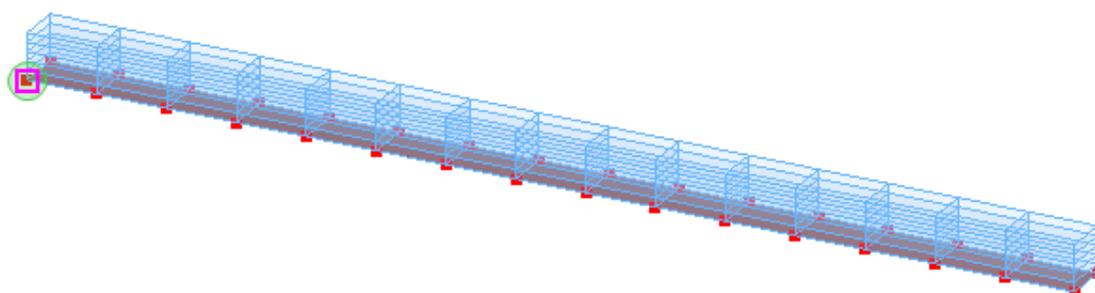


Рис. 4.43. Триангуляция плоскости балки

Выполняем упаковку схемы, при которой удаляются совпадающие узлы и осуществляются сшивка элементов и устранение внутри-программных ошибок в формировании геометрической части схемы.

На первом этапе производится выбор признака схемы расчетной модели. Варианты выбора признака схемы становятся доступны при создании новой расчетной модели (рис. 4.44). Для моделирования работы балочной конструкции в рамках практической работы принимается пространственная конструкция. В стартовом окне доступно указание папки для сохранения расчетной схемы и результатов расчета.

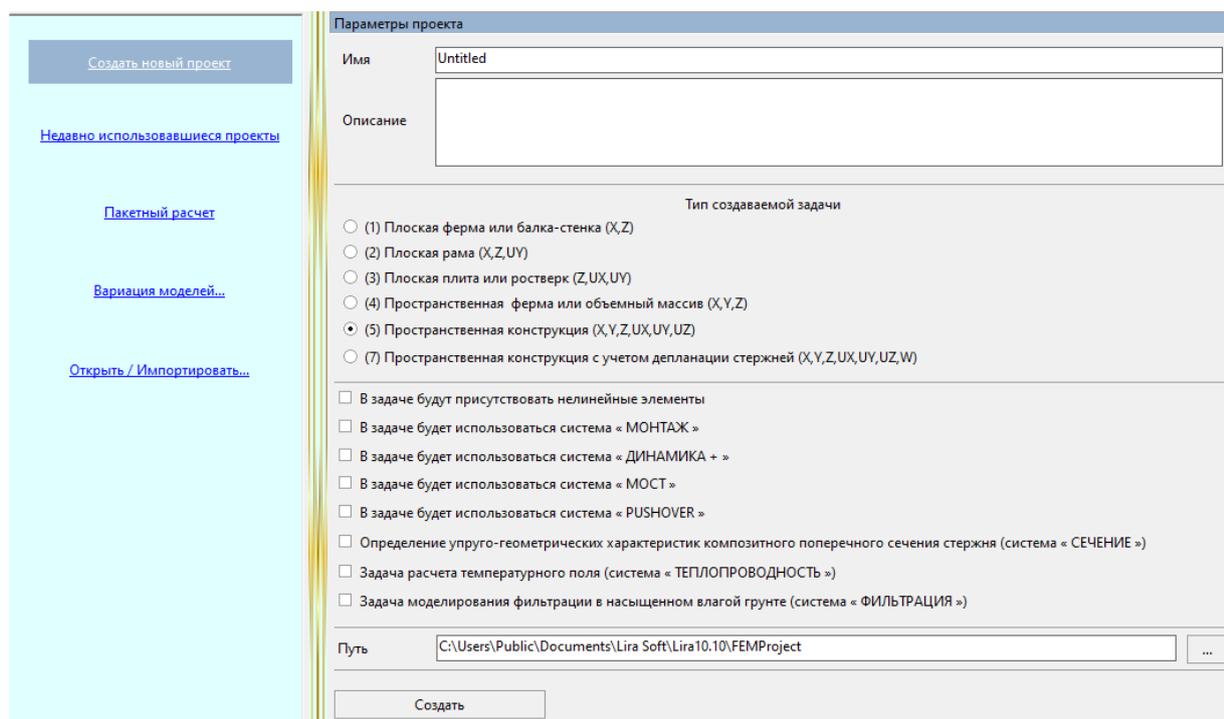


Рис. 4.44. Стартовое окно создания новой расчетной задачи

В зависимости от пролета и поперечного сечения балочной конструкции подбираются параметры вспомогательной сетки построения. Чтобы изменить параметры вспомогательной сетки, необходимо перейти в пункт «Сеть построения» (🌐) и выбрать прямоугольную сеть с шагом сетки, соответствующей геометрии горизонтальной проекции балки (рис. 4.45).

Квадратная	Полярная	Прямоугольная		
	X`	Y`		
Шаг	4.5	0.2	м	
Количество	1	1		
Угол	0	°		
			Центр	
			Xo	0 м
			Yo	0 м
			Zo	0 м
			Перенести в начало координат	
<input checked="" type="radio"/> XOY <input type="radio"/> XOZ <input type="radio"/> YOZ <input type="radio"/> XYZ				

Рис. 4.45. Параметры вспомогательной сети построения в зависимости от задания

Построение расчетной модели объемными изопараметрическими конечными элементами осуществляется за счет перемещения плоской образующей. Для создания последней необходимо перейти к следующей функции: «Схема → Арх. элементы → Пластина». Для правильного согласования местных осей конечных элементов требуется задавать отдельные узлы плоской пластины «против часовой стрелки». Результат построения представлен на рис. 4.46.

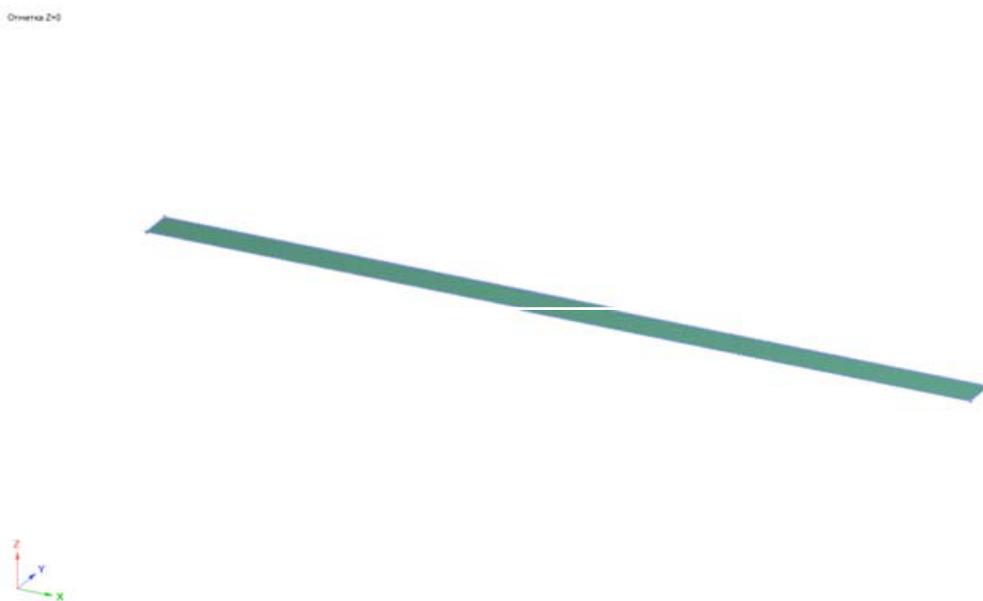


Рис. 4.46. Задание плоской образующей

Для получения требуемой сетки конечных элементов в активном

режиме задания архитектурных элементов выбираем пункт «Параметры триангуляции» ( Параметры триангуляции) и устанавливаем шаг триангуляции таким образом, чтобы суммарное количество всех конечных элементов системы после перемещения образующей не превышало 500 шт. После выбора плоской архитектурной пластины и задания требуемого шага триангуляции и сетки (прямоугольной) нажимаем кнопку «Назначить», после чего переходим к вкладке «Триангуляция» и осуществляем разбиение архитектурной пластины на сеть конечных элементов. Общий вид образующей после триангуляции изображен на рис. 4.47.

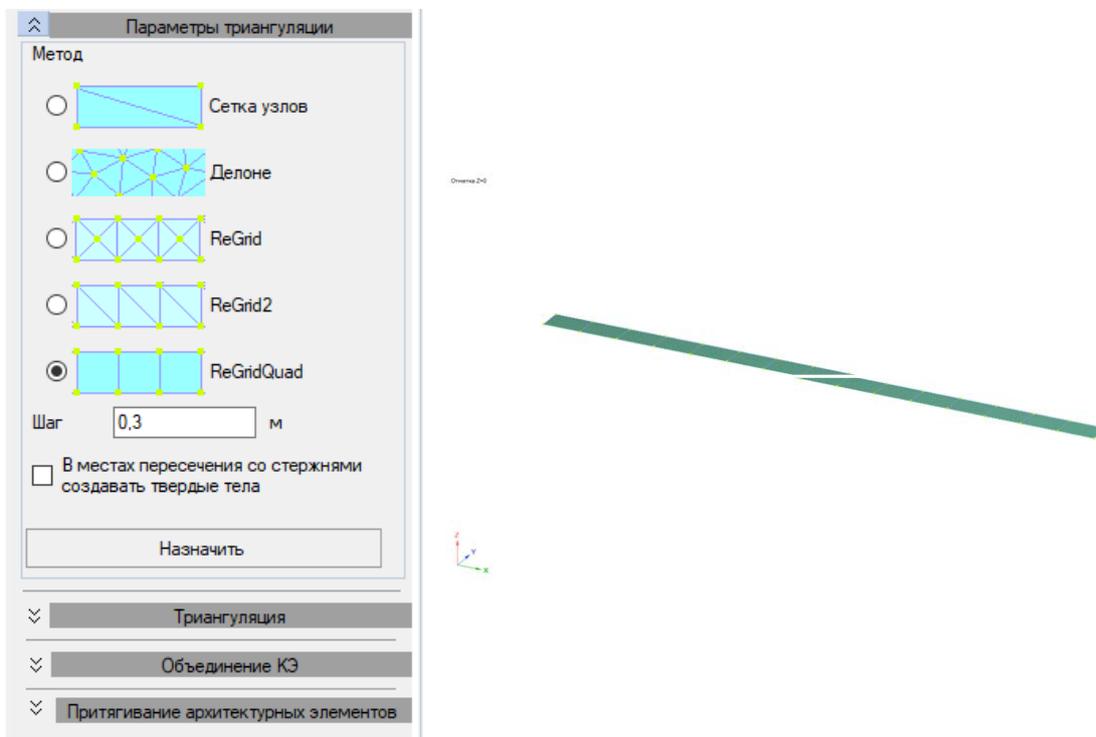


Рис. 4.47. Параметры триангуляции и общий вид образующей после разбивки

Для перемещения образующей и получения изопараметрических объемных конечных элементов переходим к следующей функции «Схема → Перемещение образующей  ». После задания нужных параметров необходимо использовать сформированный фрагмент и установить его в произвольную точку расчетной схемы. Общий вид функции перемещения образующей представлен на рис. 4.48.

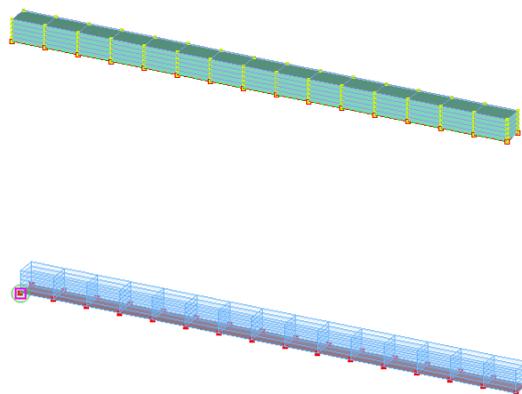
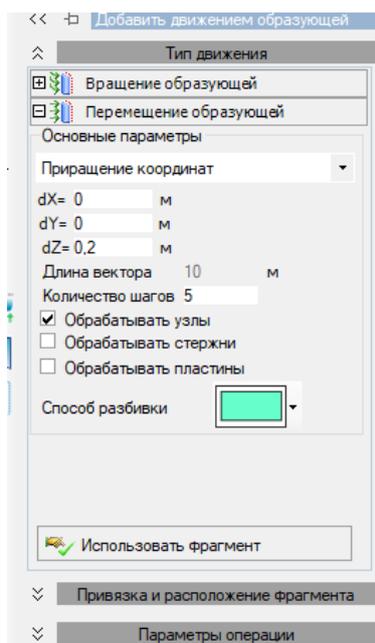


Рис. 4.48. Функция «Перемещение образующей» и результаты формирования модели

После формирования модели следует удалить все пластинчатые элементы, которые остались в расчетной модели. Для задания системы армирования отдельными стержнями или ламелями можно воспользоваться функцией «Схема → Добавить КЭ»; для добавления внешних систем армирования по всей грани (ламинаты, ткани) – функцией «Схема → Арх. элементы → Пластина», после чего соответственно добавляется конечный элемент стержня либо пластины.

Для задания соответствующих жесткостей системам армирования необходимо воспользоваться редактором сечений и жесткостей «Редакторы → Редактор сечений и жесткостей» и добавить соответствующее сечение системы армирования: для арматуры – параметрическое сечение – круг; для ламелей – прямоугольник; для ламинатов – пластины. Для задания физико-механических характеристик материалов переходим к редактору материалов «Редакторы → Редактор материалов». Древесину балочных конструкций в рамках работы возможно рассматривать как изотропный либо ортотропный материал. Физико-механические характеристики древесины принимаем по СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Материал системы армирования принимаем как изотропный; модуль упругости для углеродных ламелей – 200 ГПа, для арматуры марки АСК и ламината FRP – 50 ГПа,

АБК – 55 ГПа, ААК и ламината AFRP – 70 ГПа, для стеклоткани в составе полимерного композита толщиной 1 мм – 15 ГПа, для однонаправленной углеродной ленты в составе полимерного композита толщиной 1 мм – 50 ГПа.

После задания соответствующих параметров назначаем материалы жесткости элементам конструкции «Конструирование → Назначить сечение материал... → Использовать сечение и материал ». Общий вид панели назначения жесткостей представлен на рис. 4.49.

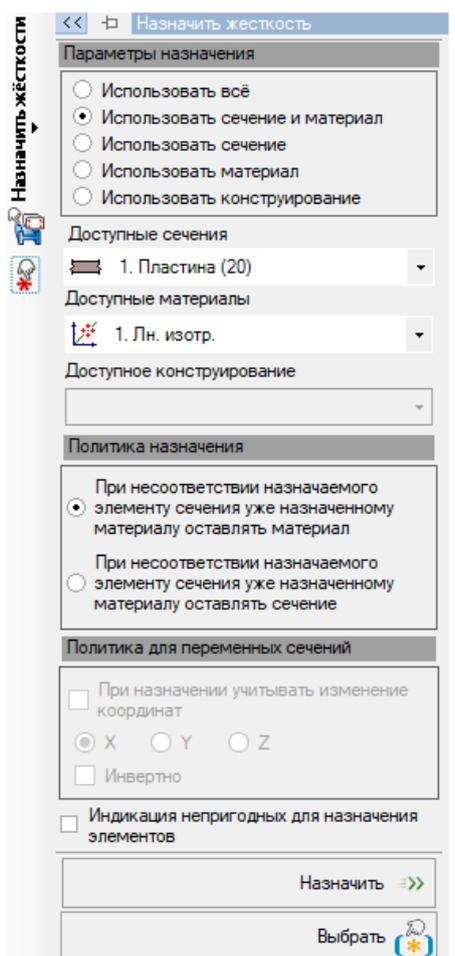


Рис. 4.49. Общий вид панели назначения жесткостей

После присвоения материалов и жесткостей задаем граничные условия. Для этого требуется перейти «Назначение → Связи». Общий вид панели назначения связей показан на рис. 4.50. Затем выбираем узлы в соответствии с расчетной схемой и применяем выбранные параметры.

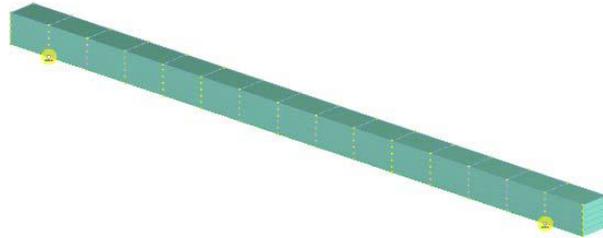
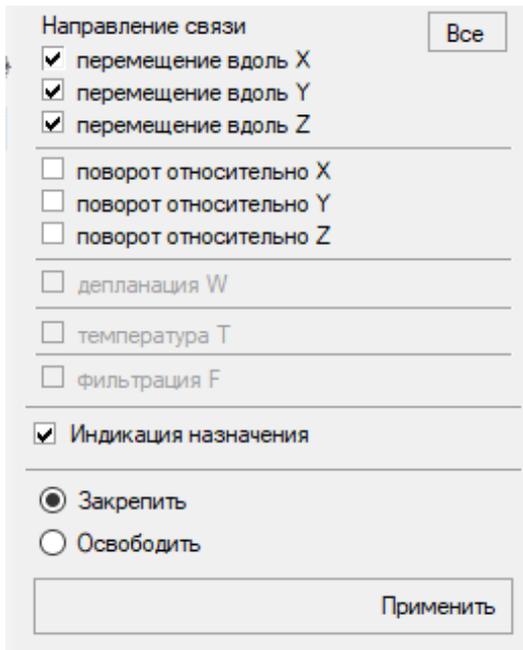


Рис. 4.50. Функция «Назначить связи» и результаты задания граничных условий (условий закрепления)

На заключительном этапе формируем загрузку конструктивного элемента расчетной нагрузкой. Полную расчетную нагрузку разбиваем на пять равных шагов. Каждое последующее загрузку принимаем равным предыдущему плюс приращение нагрузки на текущем шаге.

Для формирования сетки загрузок переходим в редактор загрузок «Редакторы → Редактор загрузок». Выбираем нормативную базу и создаем пять статических загрузок (рис. 4.51).

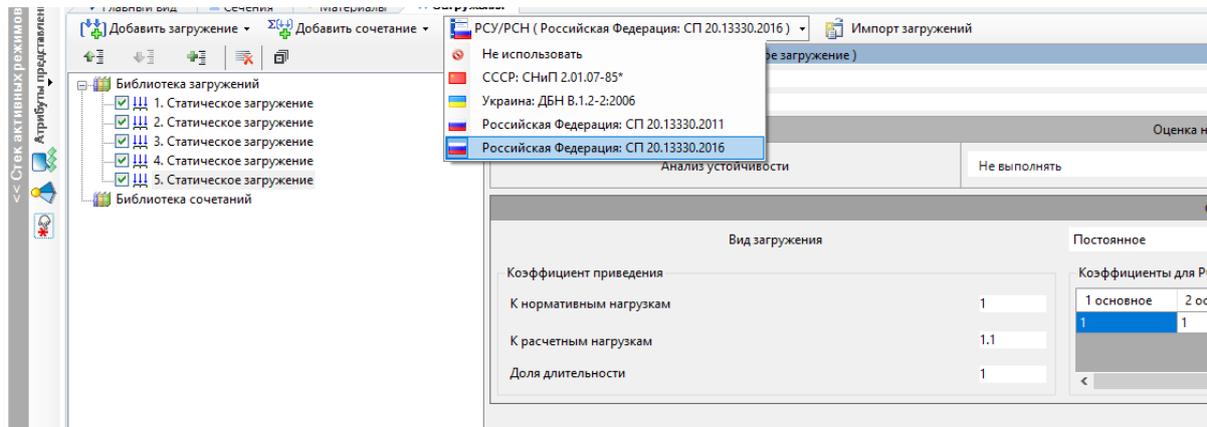


Рис. 4.51. Общий вид редактора загрузок

Для перемещения между конкретными загрузками на расчетной схеме используем соответствующий раскрывающийся список на пространстве рабочей модели (рис. 4.52).

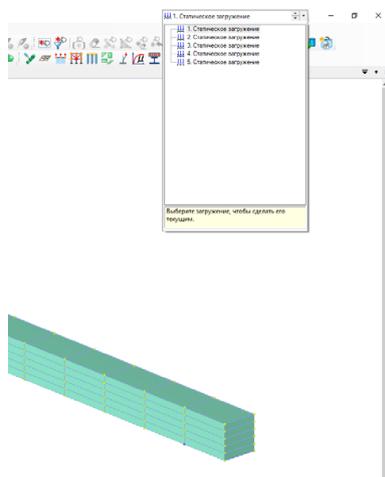


Рис. 4.52. Выбор текущего нагружения

Для задания действующей нагрузки в текущем нагружении воспользуемся функцией «Нагрузки» (Назначение → нагрузки 🏗️) и в соответствии с заданием выберем требуемое нагружение.

Перед расчетом схемы выполним ее упаковку «Правка → Упаковать/Расшить 📦». Панель активного режима «Упаковка / Расшивка» предназначена для управления параметрами упаковки созданной схемы после выполнения различных операций с геометрией. После выполненных операций произведем полный расчет конструкции «Расчет → Выполнить расчет 🏠».

После выполнения полного расчета оператор попадает в раздел анализа полученных результатов. Для анализа перемещений элементов расчетной схемы переходим к анализу узлов расчетной схемы «Результаты → Узлы 📊». В рамках работы необходимо выполнить скриншот полученных результатов перемещения узлов. Для этого осуществляем первоначальную настройку снимков видового экрана и настраиваем папку для хранения изображений «Документирование → Изображение с экрана 📷». Во вкладке «Дополнительно» (📄 **Дополнительно**) проводим настройку подписей (в рамках работы рекомендуется убрать надписи к скриншотам видового экрана). Для формирования снимка экрана воспользуемся функцией «Быстрое изображение с экрана» (Документирование → Быстрое изображение с

экрана ) , после чего выполним копирование полученного изображения в отчет. В рамках работы необходимо сделать снимки рабочего экрана по результатам для перемещения узлов на каждом нагружении. Для перехода между нагружениями воспользуемся раскрывающимся списком нагружений ( 1... Статическое нагружение ). Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции проводится на каждом нагружении путем просмотра напряжений действующих по ортогональным направлениям (N_x , N_y , N_z , T_x , T_y , T_z) в активном режиме результатов по объемным элементам «Результаты → Объемные КЭ  ». Общий вид балочной конструкции с результатами нормальных напряжений N_x (вдоль волокон) и касательных T_{xz} приведен на рис. 4.53, 4.54.

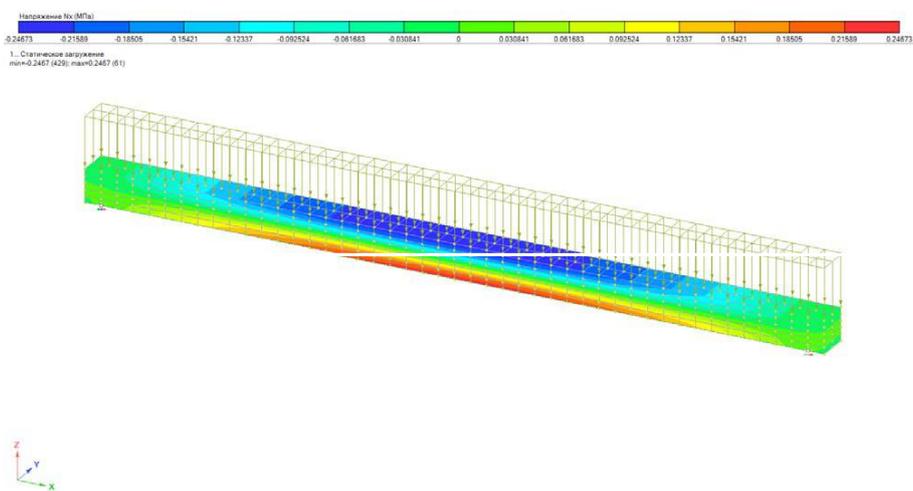


Рис. 4.53. Изополя нормальных напряжений N_x , МПа.

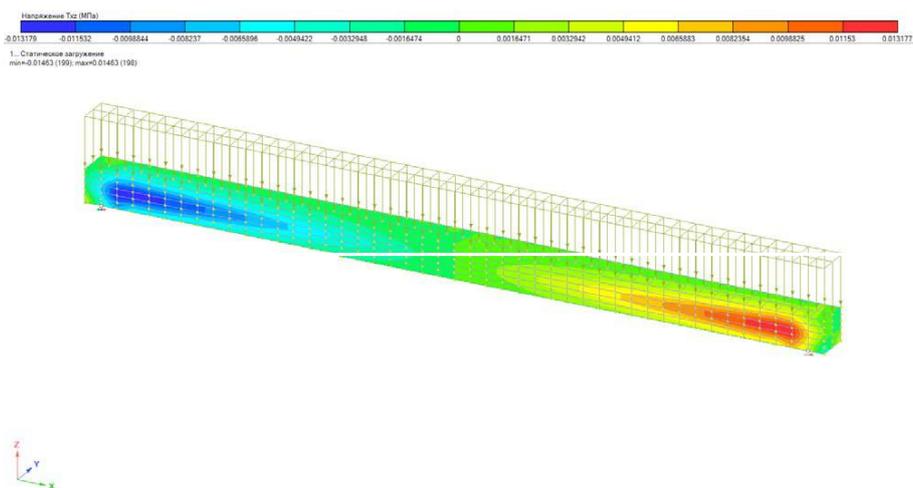


Рис. 4.54. Изополя касательных напряжений T_{xz} , МПа

В ходе численного расчета установлено, что максимальные касательные напряжения составляют 0,013 МПа, а максимальные нормальные напряжения – 0,25 МПа.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите начало работы в ПК STARK ES.
2. Как происходит формирование геометрической модели в ПК STARK ES?
3. В чем назначение материала в ПК STARK ES?
4. Как определить опорные связи в ПК STARK ES?
5. В чем состоит назначение нагрузок в ПК STARK ES?
6. Как следует выполнить статистический расчет в ПК STARK ES?
7. Проанализируйте результаты расчета в ПК STARK ES.
8. Опишите начало работы в ПК SCAD.
9. Объясните, как происходит формирование геометрической модели в ПК SCAD.
10. В чем заключается назначение материала в ПК SCAD?
11. Расскажите об определении опорных связей в ПК SCAD.
12. В чем состоит назначение нагрузок в ПК SCAD?
13. Поясните выполнение статистического расчета в ПК SCAD.
14. Проанализируйте результаты расчета в ПК SCAD.
15. Опишите начало работы в ПК LIRA 10.10.
16. Как формируется геометрическая модель в ПК LIRA 10.10?
17. В чем состоит назначение материала в ПК LIRA 10.10?
18. Как определить опорные связи в ПК LIRA 10.10?
19. В чем назначение нагрузок в ПК LIRA 10.10?

Глава 5. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. Особенности технологии изготовления армированных деревянных конструкций

В современных условиях наиболее технологичны и широко освоены клееные деревянные конструкции прямоугольного сечения, поэтому целесообразно применять такие сечения и для армированных конструкций. Кроме того, прямоугольное сечение более массивное по сравнению с коробчатым или двутавровым, полнее отвечает требованиям долговечности и огнестойкости, предъявляемым сегодня к несущим деревянным конструкциям.

Поскольку технология изготовления клееной заготовки армированной конструкции отличается от обычной лишь тем, что в крайние грани сечения вклеиваются арматурные стержни или полукаркасы, рассмотрим особенности изготовления, связанные с процессом вклеивания и защиты арматуры. При изготовлении армированных деревянных конструкций следует учитывать, что габаритные размеры сечений клееных заготовок значительно меньше, чем габаритные размеры аналогичных неармированных конструкций. Так, высота сечений заготовок армированных конструкций меньше на 20 – 30 %, а ширина обычно составляет 120 – 170 мм, монтажная масса на 30 – 40 % меньше, чем у неармированных конструкций. Это приводит к снижению трудозатрат на изготовление клееных заготовок, позволяет увеличить оборачиваемость и производительность прессового оборудования.

При изготовлении армированных конструкций наиболее трудоемок процесс вклеивания арматуры, который включает операции приготовления клеевой композиции для склеивания арматуры с древесиной; фрезерование пазов по пластям досок для арматуры; сверление отверстий для поперечных стержней; подготовку арматуры (резку и сращивание по длине, очистку от загрязнений, обезжиривание, сварку полукаркасов); нанесение клеевой композиции, укладку и запрессовку стержней арматуры или арматурных полукаркасов.

Операции по фрезерованию пазов, укладке и запрессовке арматуры можно выполнять, выбрав один из двух вариантов. Первый вари-

ант осуществляется на склеенных заготовках полного габарита, имеющих заданную высоту и ширину конструкции, что весьма трудоемко (рис. 5.1, а), так как связано с необходимостью кантовать заготовку при двухстороннем армировании и повторно использовать прессовое оборудование, а также на отдельных плетях (доски, стыкованные по длине с пазами и остроганные), которые при сборке клееного пакета укладываются в крайние зоны (рис. 5.1, б). Второй вариант изготовления – более рациональный, так как позволяет выделить операции по вклеиванию арматуры и провести их параллельно другим операциям по изготовлению клееной конструкции, однако затрудняет армирование полукаркасами с поперечной арматурой.

Рациональным с конструктивной и технологической точки зрения считается армирование конструкций по боковым поверхностям при ширине сечения до 100 – 150 мм. В этом случае пазы под арматуру фрезеруются по боковым поверхностям заготовки, которая лежит плашмя, причем растянутая арматура располагается по линии главных растягивающих деформаций (рис. 5.1, в). При подобном решении армирования возможно применение конструкций составного по ширине сечения (рис. 5.1, г), что позволит получить сечение шириной 200 мм и более и значительно сократить расходы на изготовление, так как отпадает необходимость кантовать конструкцию при вклеивании стержней с выдержкой в каждой позиции 10 – 12 ч. При этом в целях повышения огнестойкости конструкций арматуру размещают внутри составного сечения. Составные по ширине армированные элементы соединяют стяжными болтами диаметром 14 – 16 мм через 2 – 3 м по длине, причем болтовые соединения с этой же целью целесообразно утапливать в древесину и закреплять деревянными пробками (см. рис. 5.1, г).

Арматурные стержни обычно вклеивают в пазы, расположенные в один ряд по ширине сечения и фрезерованные по длине пласти или образованные отдельными брусками толщиной, равной наружному диаметру арматуры. Форму и размеры паза выбирают исходя из условий обеспечения надежного склеивания арматуры с древесиной и минимального расхода клееного состава.

Обычно этим требованиям отвечают пазы прямоугольного и полукруглого профилей (рис. 5.2). При этом размеры паза (ширина и глубина) принимаются равными $d_a + 1$ мм, где d_a – диаметр арматуры. Расстояние между осями стержней должно быть не менее двух диаметров.

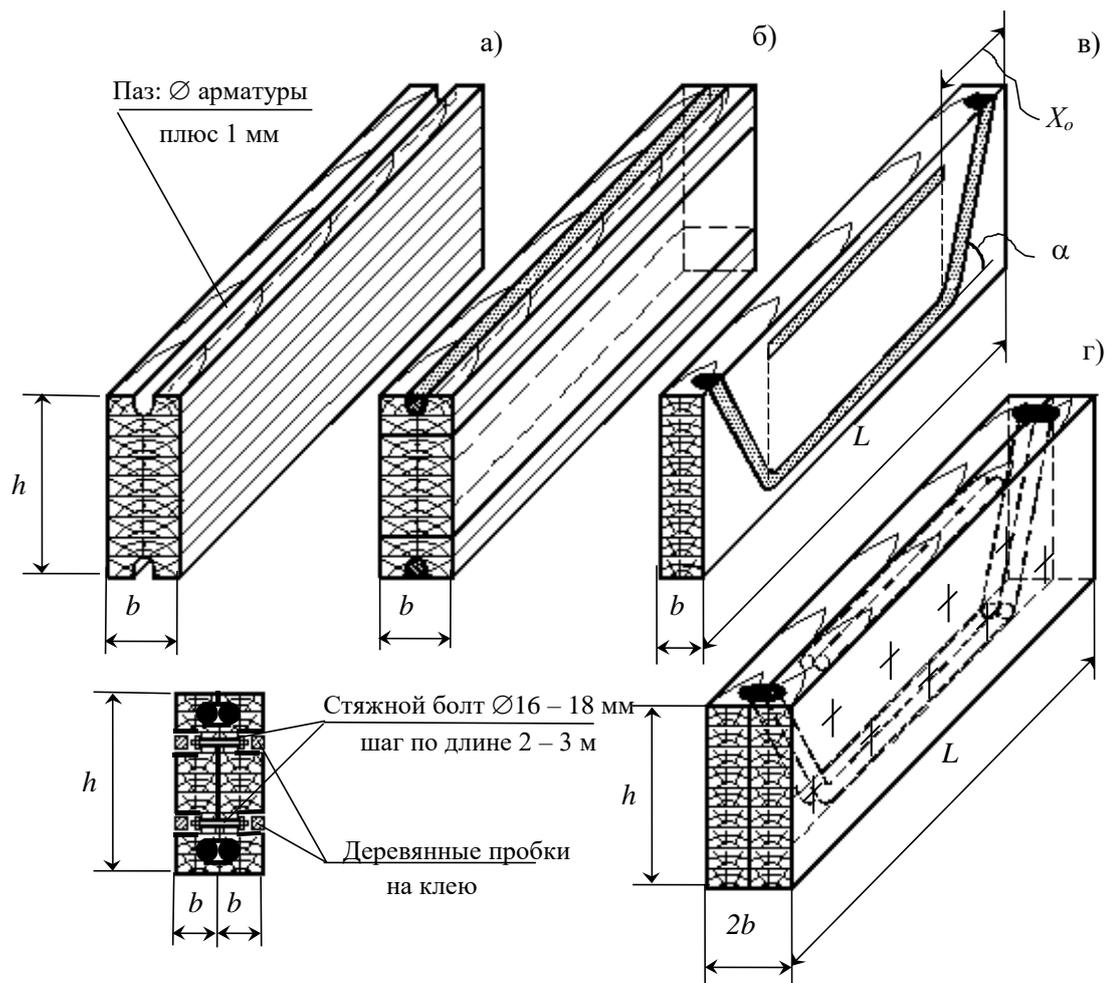


Рис. 5.1. Технологические варианты изготовления деревянных армированных балок

В случае ограниченной ширины сечения возможно применение группового армирования, при котором стержни (не более трех) размещают в общем пазу. В этом случае стержни соединяются сваркой в общий пакет, пазы заполняются с помощью специального устройства (шприца с диаметром сопла не менее 12 мм) или шпателя. Последний способ применяют для вязкого клеевого состава при количестве наполнителя более 300 массовых частей на 100 массовых частей смолы.

При вклеивании арматуры необходимо создать контактное (минимальное) давление порядка 0,05 – 0,1 МПа (0,5 – 1 кгс/см²) для фиксации арматуры в проектом положении. Такое давление легко создается с помощью инвентарных запрессованных устройств (вайм, при-

жимов и др.) в точках, расположенных по длине арматуры на расстоянии 20 – 25 диаметров стержня друг от друга. Процесс склеивания при температуре 18 – 20 °С происходит в течение 10 – 12 ч: за это время клеевое соединение достигает разборной прочности (60 – 70 % от конечной); при нагреве до 50 – 60 °С разборная прочность достигается через 2 – 3 ч с последующей 30-минутной выдержкой в прессе.

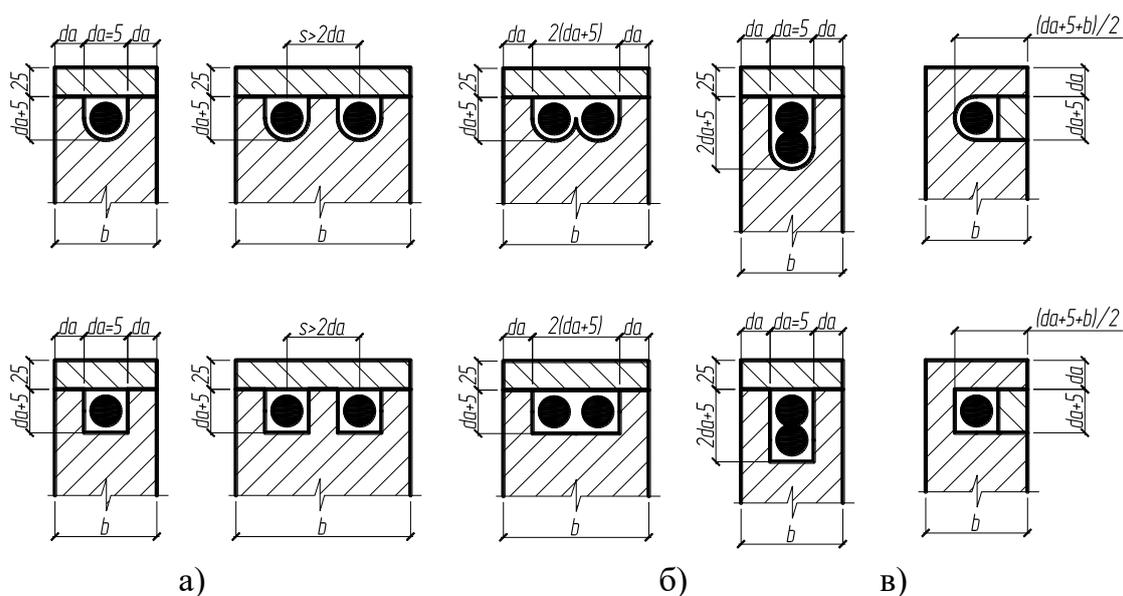


Рис. 5.2. Размещение пазов полукруглого и прямоугольного очертания по ширине сечения: а – обычным способом; б – групповым способом; в – при вклеивании стержня по боковой поверхности

Процесс склеивания можно ускорить, нагревая заготовки конвекционным способом в камере аэродинамического прогрева или терморadiационным способом с помощью инфракрасных электрических излучателей.

Клееные заготовки вместе с армированными элементами собирают на клею обычными способами, так как армированный элемент по размерам не отличается от обычной стыкованной по длине ламели.

При армировании конструкций полукаркасами, представляющими собой основную продольную арматуру с приваренными перпендикулярно или под углом к ней поперечными стержнями длиной не менее $0,55h$ или $20 - 25d$ (h – высота сечения), в клееной заготовке под поперечную арматуру каркаса сверлятся отверстия диаметром, на 5 мм

превышающим наружный диаметр стержня, и боковые отверстия диаметром 3 – 5 мм для выдавливания воздушных пробок и избытка клея.

Производство конструкций с поперечным армированием требует последовательных операций:

- сверление по кондуктору отверстий (вертикальных или наклонных) и удаление из них (сжатым воздухом) стружки с контролем точности и глубины сверления путем постановки контрольного стержня в отверстие насухо;

- заполнение отверстий дозированным количеством клея с защитой поверхности конструкции от его попадания;

- погружение виброинструментом очищенных, обезжиренных и смазанных клеем стержней, их фиксация в проектном положении с дополнительной подливкой клея по мере его поглощения древесиной;

- технологическая выдержка стержней до набора клеевым соединением разборной (технологической) прочности с испытанием контрольных образцов, изготовленных на той же порции клея и по той же технологии;

- сварка элементов с вклеенными стержнями, если необходимо, выполняется в следующей технологической последовательности: закрепление закладных металлических деталей в проектном положении; сварка постоянным током перекрестными, прерывистыми швами (шпонками) с перерывами для охлаждения металла и контроля качества шва с удалением шлака; древесина во время сварки должна быть защищена экраном из листовой стали;

- проверка по шаблону или путем контрольной сборки геометрических параметров жесткого стыка (узла), маркировка клееных элементов.

После выемки из пресса конструкция отправляется на склад готовой продукции, где выдерживается в течение 7 – 10 дней.

При изготовлении армированных деревянных конструкций необходим систематический контроль прочности клеевых соединений арматуры с древесиной. С этой целью от каждого замеса клея изготавливают образцы – кубики размерами 20×20×20 мм, которые испытываются через 7 – 10 дней после изготовления конструкции. При этом прочность кубиков при сжатии должна быть не менее 65 МПа

(650 кгс/см²). Для проверки прочности клеевого соединения изготавливают деревянные образцы в виде призм с вклеенными стержнями, которые испытывают на сдвиг при растяжении или сжатии.

Во всех случаях прочность соединения, определяемая величиной отношения разрушающего усилия к поверхности склеивания, должна быть не менее 6 МПа (60 кгс/см²) при разрушении соединения не менее чем на 90 % по древесине.

При этом прочность соединения определяется по формуле

$$\tau_{\text{сц}} = N / F_{\text{сц}},$$

где $F_{\text{сц}} = \pi d_{\text{п}} L_{\alpha}$ – площадь поверхности сцепления арматуры с древесиной; $d_{\text{п}}$ – диаметр паза; L_{α} – длина вклеенной части арматуры.

Качество готовых изделий должно проверяться путем контрольного испытания конструкций до разрушения согласно действующим рекомендациям по испытанию деревянных конструкций [17]. При запрессовке клееного пакета с армированными элементами качество склеивания повышается за счет более равномерного распределения давления по длине заготовки, которое происходит из-за меньшей деформативности армированного элемента под сосредоточенными грузами запрессовочных устройств.

Для повышения огнестойкости и долговечности конструкций арматура защищается доской толщиной не менее 25 мм, наклеиваемой поверх стержней, или вкладышем в глубокий паз поверх арматуры.

5.2. Особенности процесса вклеивания арматуры в деревянные заготовки конструкций

Прочность, надежность и долговечность армированных деревянных конструкций в значительной мере зависят от клеевых соединений, используемых для склеивания древесины с арматурой.

Эффективным является так называемое рациональное армирование, при котором стержни растянутой арматурой размещаются по траекториям главных растягивающих деформаций. Такое армирование позволяет повысить надежность конструкций и усовершенствовать технологию изготовления (см. рис. 5.1, в, г).

При склеивании арматуры с древесиной клей переходит в твердое состояние с последующим по мере отверждения увеличением механической прочности клеевого слоя и сцеплением его со склеиваемыми материалами.

Клеевой шов принято рассматривать как единую композицию из клеевого слоя и двух прилегающих материалов. При этом прочность соединения зависит от механических свойств как клея, так и наиболее слабого из склеиваемых материалов, в данном случае – древесины.

Необходимо, чтобы при склеивании древесины с арматурой прочность соединения превышала прочность основного материала конструкции – древесины. Тогда разрушение такого соединения будет происходить от скалывания древесины вдоль волокон.

Клеевые соединения арматуры с древесиной должны отвечать следующим требованиям:

- иметь высокую механическую прочность и достаточную жесткость;
- стойкость к циклическим температурно-влажностным воздействиям – долговечность;
- малую ползучесть при длительном действии нагрузки;
- технологичность.

Из довольно широкого ассортимента клеев, выпускаемых промышленностью, таким требованиям удовлетворяют только эпоксидные, фенолоформальдегидные и полиуретановые. Однако фенолоформальдегидные клеи, содержащие кислотные отвердители, обладая низкой стоимостью и доступностью, вызывают коррозию стальной арматуры, что требует специальных мероприятий по ее защите, следовательно, усложняет технологический процесс и повышает стоимость изделия. Полиуретановые клеи пока недостаточно изучены и дефицитны.

В полной мере отвечают предъявляемым требованиям клеи на основе эпоксидных смол, которые в большинстве случаев используются в виде многокомпонентных клеевых композиций. Применяя для наполнения и отверждения эпоксидных клеев различные наполнители и отвердители, удастся получить клеевые соединения, удовлетворяющие не только перечисленным выше требованиям, но и обладающие высокой теплостойкостью и относительно низкой стоимостью. Последнее

достигается за счет введения в композицию на 100 массовых частей смолы 200 – 400 массовых частей наполнителей, что приводит к снижению содержания смолы (наиболее дорогого компонента) в клее до 15 – 25 %. Например, при стоимости 1 кг смолы ЭД-20, равной 4,0 усл. ед., стоимость 1 кг клеевой композиции составит 0,68 – 1,0 усл. ед.

Для клеевых соединений арматуры с древесиной наиболее технологичными являются композиции, приготовленные на основе эпоксидных смол марок ЭД-20, ЭИС-1 и др. Их жизнеспособность зависит от вида и количества отвердителя и после введения отвердителя равна 45 – 120 мин. Основные составы клеевых композиций, рекомендуемых для применения в армированных деревянных конструкциях, приведены в таблице. Расход клеевой композиции в зависимости от паза и диаметра арматуры определяется по графику на рис. 5.3.

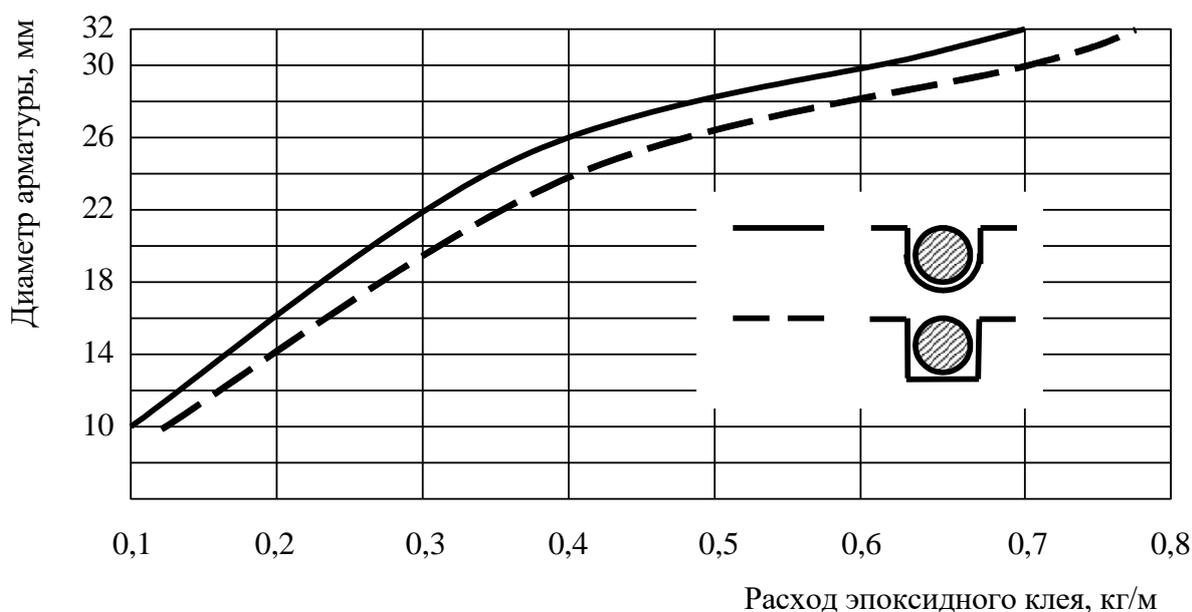


Рис. 5.3. Расход клеевой композиции в зависимости от профиля паза и диаметра арматуры

При выборе клеевой композиции для соединений в армированных конструкциях следует учитывать, что некоторые традиционные компоненты в названных составах далеко не оптимальные, поэтому взамен их приведены новые, свойства которых повышают технологичность и качество клеевых соединений.

Эпоксидные клеевые композиции для склеивания
арматуры с древесиной

Компоненты		Содержание в массовых частях для вариантов клеевых композиций				
Назначение	Наименование	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Связующее	Эпоксидно-диановая смола ЭД-20	100	100	100	–	–
	Алкилрезорциновая эпоксидная смола МГФ-9	–	–	–	100	100
Пластификатор	Дибутилфталат, или полиэфир МГФ-9	20 – 25	–	–	25	–
Растворитель	Сламор (сланцевый модификатор)	–	30	30	–	30 – 50
Отвердитель	Полиэтиленполиамин (ПЭПА)	10 – 12	–	–	–	–
	Оксиэтилированный полиэтилендиамин (УП-0622)	–	–	10 – 12	10	–
	Диамин	–	20 – 25	–	–	20
Наполнитель	Портландцемент	200	–	–	–	–
	Проклеенный песок, просеянный через сито 1,0 мм	–	до 400	до 350	до 300	до 400

Например, полиэтиленполиамин – наиболее распространенный аминный отвердитель, он весьма гигроскопичен, чувствителен к температурному режиму отверждения и рецептурному составу, токсичен. Поэтому разработаны оксиэтилированные аминные отвердители, которые отличаются меньшей токсичностью и летучестью, более низкой стоимостью и доступностью.

Взамен дибутилфталата, который испаряется из эпоксидных композиций, растворяется в воде, тем самым снижая качество и стойкость клеевых соединений, целесообразно применять сланцевый модификатор (сламор). Сламор – поверхностно активное вещество – повышает смачивающие свойства эпоксидных композиций, снижает расход отвердителя на 15 – 20 %, упрощает составление композиций с высоким содержанием наполнителя и служит катализатором при отверждении. Являясь продуктом недорогим и доступным, сламор снижает не только начальную вязкость клеевой композиции, но и существенно ее стоимость.

В качестве наполнителя наиболее эффективен песок (доступен и имеет низкую стоимость), тогда как цемент отрицательно взаимодействует с аминными отвердителями, а его частицы, будучи гигроскопичными, могут, присоединяя воду, увеличиваться в объеме (набухать), вследствие этого в клеевом шве в процессе эксплуатации возникают внутренние раскалывающие напряжения, которые снижают долговечность и надежность соединения.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные этапы технологии изготовления деревокомпозитных конструкций (ДКК).
2. Какие современные эффективные пути совершенствования конструктивных решений ДКК и технологии их изготовления вы знаете?
3. Какие факторы обуславливают прочность и надежность клеевого соединения древесина – арматура?
4. Какие требования предъявляются к клеевым композициям, предназначенным для вклеивания арматуры?
5. Перечислите современные эффективные вяжущие, используемые для изготовления клеевых композиций.
6. Как эффективно можно снизить стоимость клеевых композиций?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесина – один из старейших строительных материалов, использующихся уже тысячи лет. Благодаря превосходным структурным и эстетическим свойствам она служит излюбленным строительным материалом для архитекторов. Климатическая политика, направленная на ограничение выбросов парниковых газов, воплощенная в строительной практике, поддерживает более широкое строительство многоэтажных деревянных зданий. Появляются исследования общественного восприятия древесины как конструкционного строительного материала, но тщательного изучения факторов, лежащих в основе будущего многоэтажного деревянного домостроения, пока недостаточно. Современное общество все более ориентируется на экологичное жилье, поэтому внедрение в практику проектирования и строительства деревянного домостроения является закономерным процессом.

Мегатенденции к урбанизации и в то же время истощение природных ресурсов способствуют расширению масштабов строительных решений, которые будут экологически, экономически и социально «умнее», чем преобладающие ранее решения.

Деревокомпозитные многоэтажные здания можно рассматривать как инновацию в строительном секторе, бросающую вызов устоявшимся выборам материалов и технологий в промышленном строительстве. Концепции деревянного многоэтажного строительства варьируются от традиционного строительства до сборки на месте элементов и компонентов, произведенных за пределами строительного объекта, с различными нормами использования древесины.

На сегодняшний день несущие деревокомпозитные конструкции достаточно изучены, чтобы их широко внедрять в практику проектирования и строительства. Консервативность строительной отрасли и ее сильная зависимость от традиционного предпочтения бетона в качестве доминирующего сырья, нежелание внедрять новые методы или материалы, которые обычно связаны с большим риском и неподвижными затратами, – вот основные причины низкой доли строительства зданий из деревокомпозита.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – М. : Стандартинформ, 2018. – 95 с.
2. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. – М. : Стандартинформ, 2017. – 105 с.
3. СП 451.1325800.2019. Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования. – М. : М-во стр-ва и жилищно-коммун. хоз-ва Российской Федерации, 2019. – 29 с.
4. СП 452.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования. – М. : М-во стр-ва и жилищно-коммун. хоз-ва Российской Федерации, 2019. – 53 с.
5. СП 515.1325800.2022. Здания из клееного деревянного бруса. Правила проектирования и строительства. – М. : М-во стр-ва и жилищно-коммун. хоз-ва Российской Федерации, 2022. – 42 с.
6. ГОСТ 24329-80. Древесина модифицированная: способы модифицирования. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1980. – 16 с.
7. Добромыслов, А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам / А. Н. Добромыслов. – М. : АСВ, 2004. – 72 с.
8. Иванов, В. А. Конструкции из дерева и пластмасс / В. А. Иванов, В. З. Клименко. – Киев : Вища шк. Голов. изд-во, 1983. – 279 с.
9. Ковальчук, Л. М. Производство деревянных клееных конструкций / Л. М. Ковальчук. – М. : Стройиздат, 1979. – 216 с.
10. Деревянные конструкции в строительстве / Л. М. Ковальчук [и др.]. – М. : Стройиздат, 1995. – 245 с.
11. Серов, Е. Н. Проектирование деревянных конструкций : учеб. пособие / Е. Н. Серов. – М. : АСВ, 2015. – 536 с.
12. Лукина, А. В. Совершенствование технологии восстановления деструктированной древесины в элементах деревянных конструкций : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Лукина А. В. – Архангельск, 2014. – 20 с.
13. Современные технологии возведения многоэтажных деревянных домов / Л. А. Коклюгина [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 1 (47). – С. 231 – 238.

14. Бойтемирова, И. Н. CLT-панели – эффективный материал из древесины для несущих и ограждающих конструкций зданий / И. Н. Бойтемирова, Е. А. Давыдова // Вестник научных конференций. – 2016. – № 12-1 (16). – С. 18 – 21.

15. Шамаев, В. А. Химико-механическое модифицирование древесины / В. А. Шамаев. – Воронеж : Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2003. – 260 с.

16. Ван-Хо-бин, Е. А. Перспективы строительства высотных зданий из CLT-панелей в России / Е. А. Ван-Хо-бин // Новые идеи нового века : материалы междунар. науч. конф. – М. : ФАД ТОГУ, 2016. – Т. 3. – С. 213 – 217.

17. Lukina, A. Method for Restoring Destructed Wooden Structures with Polymer Composites / A. Lukina, S. Roshchina, A. Griбанov // Proceedings of ECE 2020: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19 – 20 ноября 2020 года. – Cham : Springer, 2021. – P. 464 – 474. – DOI 10.1007/978-3-030-72404-7_45.

18. Fischer, H. Ecological comparison of hygrothermally safe floor constructions based on renewable raw materials for multi-storey buildings / H. Fischer, F. Frühwald, A. Korjenic // Journal of Building Engineering, 2022, 57, 104899.

19. Viholainen, N. Bringing ecosystem thinking to sustainability-driven wooden construction business / N. Viholainen, E. Kylkilahti, M. Autio // Journal of Cleaner Production 292 (2021) 126029.

20. Деревянные многоэтажки. История и перспективы [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kvartirazamkad.ru/magazine/derevyannye-mnogoetazhki-istoriya-i-perspektivy> (дата обращения: 12.09.2023).

21. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4 [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О. А. Ковальчук [и др.] ; М-во образования и науки Рос. Федерации ; Нац. исслед. Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. текстовые данные и прогр. (10 Мб). – М. : НИУ МГСУ, 2015. – URL: <https://lira-soft.com/download/manuals/> (дата обращения: 19.09.2023).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ЗАДАНИЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

по дисциплине:

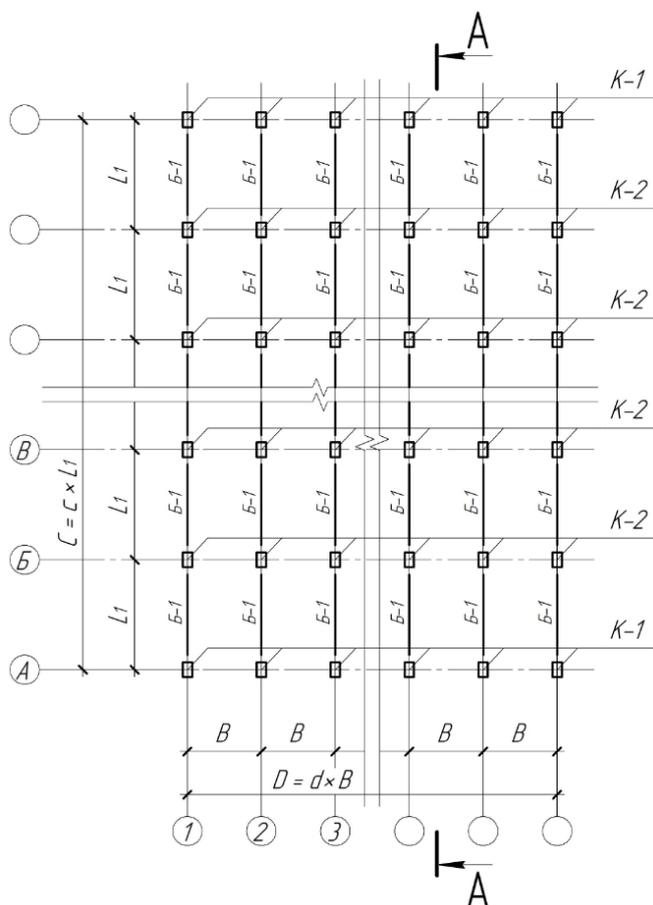
«Проектирование индустриальных деревянных конструкций»

Тема: расчет и конструирование каркаса многоэтажного здания гражданского назначения, выполненного из армированных клееных деревянных элементов.

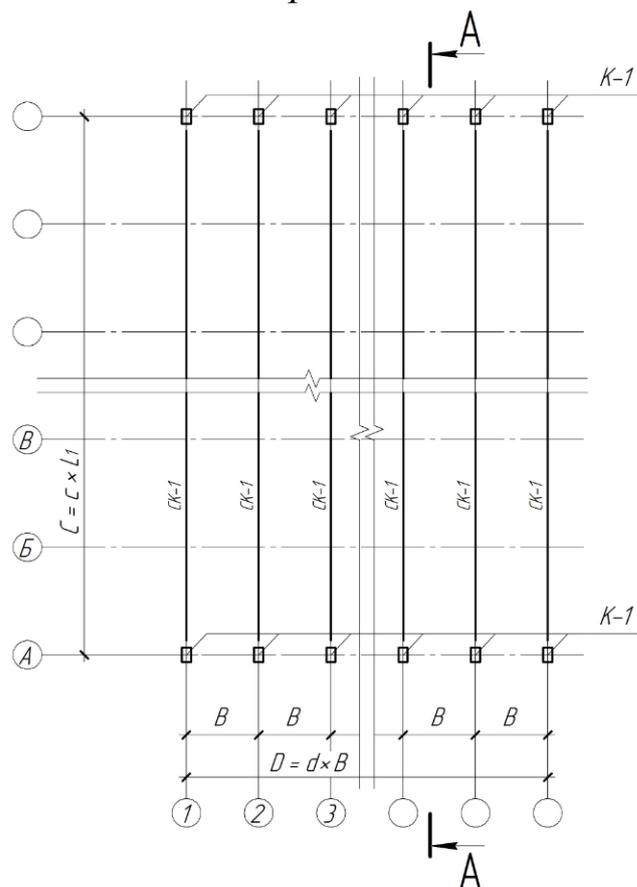
Цель работы: изучить и освоить методику конструирования несущих элементов многоэтажного здания из армированной клееной древесины в процессе комплексного расчета каркаса здания.

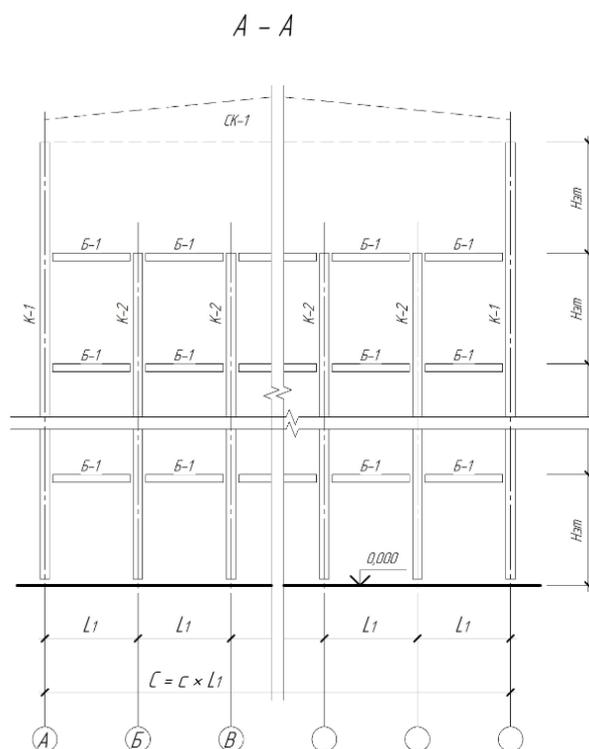
Компоновочная схема каркаса:

План типового этажа



План верхнего этажа





Варианты заданий к курсовому проекту

по дисциплине:

«Проектирование промышленных деревянных конструкций»

Исходные данные для проектирования многоэтажного здания
из деревокомпозитных конструкций

Строки	Район строительства	Кол-во этажей	$B, \text{ м}$	k $L_1 = k \times B$	c	d	Класс арматуры
	а	б	в	г	д	е	ж
1	Вологда	4	3,3	1,2	3	4	A500
2	С.-Петербург	5	3,6	1,25	4	5	A400
3	Волгоград	6	3,9	1,3	5	6	АБК
4	Белгород	7	4,2	1,4	6	7	АУК
5	Уфа	8	4,5	1,5	7	8	ААК
6	Владимир	9	4,8	1,6	3	4	АКК
7	Тула	10	5,1	1,7	4	5	A500
8	Владивосток	11	5,6	1,8	5	6	A400
9	Омск	12	6,0	2,0	6	7	АБК
0	Орел	14	6,6	2,2	7	8	АУК

ПРИМЕЧАНИЕ: исходные данные выбираются в соответствии с шифром, который назначается каждому студенту индивидуально.

Например, назначен следующий шифр задания: 21964.

Далее разряды цифр шифра нумеруются буквами алфавита:

а б в г д е ж – номера столбцов в таблице исходных данных

2 1 9 6 4 – номера строк в таблице исходных данных

В таблице выше отмечены ячейки с числовыми значениями исходных данных для данного шифра.

Дополнительные данные:

Полезная нагрузка на перекрытия $p = 4,0$ кПа = 400 кг/м².

Высота этажа принимается равной $H_{эт} = 3,6$ м.

Сечения элементов:

балки главные $h/L = 1/15 \dots 1/25$; $b/h = 1/6 \dots 1/8$;

балки второстепенные $h/L = 1/20 \dots 1/30$; $b/h = 1/6 \dots 1/8$;

колонны $h/L = 1/10 \dots 1/15$; $b/h = 1/4 \dots 1/5$.

Порядок работы:

– провести статический расчет каркаса здания согласно монтажной схеме на рисунке;

– выполнить конструирование основных несущих конструкций каркаса: стропильной конструкции, балок перекрытия, колонн;

– в пояснительной записке представить основные результаты расчета в графическом и табличном видах;

– в графической части проекта представить чертежи монтажной схемы, разрезов, узлов, детализированных для основных несущих конструкций каркаса.

Клееные армированные деревянные конструкции

Наименование	Пролет, м	Расчетные нагрузки кН/м	Поперечное сечение	Армирование	Относительная высота сечения	Относительная ширина сечения	Коэффициент армирования, %	Коэффициент собственной массы, %
Однопролетные балки постоянной высоты	6–30	9–27	Прямоугольное сплошное	Двойное симметричное	1/15–1/20	1/6–1/8	1,2–3,5	4–7
Двускатные балки	12–24	9–27	То же	Одиночное растянутой зоны	1/12–1/17	1/6–1/8	1,2–2,5	4–7
Двускатные гнутоклееные балки постоянной высоты	12–27	9–18	« «	Двойное симметричное	1/15–1/25	1/6–1/8	1,2–3,0	4–7
Одно- и двухконсольные балки	12–24	9–27	« «	То же	1/17–1/25	1/6–1/8	1,2–3,5	3,5–6
Двухпролетные балки постоянной высоты	6–18	9–27	« «	« «	1/17–1/30	1/6–1/8	1,0–3,5	3,5–6
Треугольные арки с затяжкой	12–30	9–24	« «	Двойное несимметричное	1/30–1/55	1/5–1/7	1,5–3,0	2–4
Треугольные стрельчатые арки	18–36	9–18	« «	То же	1/35–1/60	1/5–1/7	1,2–3,0	2–4
Трехшарнирные арки криволинейного очертания	18–60	9–18	Прямоугольное сплошное	Двойное симметричное или несимметричное	1/40–1/60	1/4–1/6	1,5–3,0	2–4
Двухшарнирные арки криволинейного очертания	18–60	9–18	То же	То же	1/45–1/65	1/4–1/6	1,5–3,0	2–4
Гнутоклееные трехшарнирные рамы с постоянной высотой сечения	18–60	9–18	« «	« «	1/20–1/35	1/5–1/7	1,0–3,0	4–8
Трехшарнирные рамы из прямолинейных элементов с армированным карнизным узлом	18–42	9–18	« «	« «	1/20–1/25	1/5–1/7	2,0–4,0	4–8
Колонны (стойки) постоянного сечения	4–8	–	Прямоугольное	« «	1/10–1/15	1/4–1/5	1,5–3,0	5–10
Ступенчатые колонны	8–15	–	То же	То же	1/10–1/15	1/4–1/5	1,5–3,0	5–10
Плиты покрытий под кровлю из асбестоцементных листов, профилированного настила или рулонную	6–12	–	« «	Двойное симметричное	1/35–1/40	–	2,0–4,0	–

Учебное электронное издание

ЛУКИНА Анастасия Васильевна
РЕПИН Владимир Анатольевич
ЧИБРИКИН Данила Александрович
и др.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕРЕВОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебное пособие

Редактор А. П. Володина
Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов
Компьютерная верстка Л. В. Макаровой, А. Н. Герасина
Корректор О. В. Балашова
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт архитектуры, строительства и энергетики
кафедра строительных конструкций
dachibrikin@outlook.com