

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЬЯ»

ГОРЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПОЖАРЕ



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
Кафедра «Техносферная безопасность»

ГОРЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПОЖАРЕ

Учебное пособие

Текстовое (символьное) электронное издание

Редакционно-издательский отдел ГАУ Северного Зауралья

Тюмень 2022

© С. П. Амельчугов, Р. Г. Шубкин, А. В. Антонов, С.В. Романов, М.А. Никулин, 2022
© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2022

ISBN 978-5-98346-098-0

УДК 624.011.1
ББК38.3+68.9
Г68

Рецензенты:

начальник кафедры «Военно-технических дисциплин» Тюменского высшего военно-инженерного командного училища имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, кандидат технических наук А.В. Наговицын;
доцент кафедры «Лесное хозяйство, деревообработка и прикладная механика» ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, кандидат технических наук А.А. Побединский

Амельчугов, С.П.

Горение древесины при пожаре : учебное пособие / С. П. Амельчугов, Р. Г. Шубкин, А. В. Антонов, С. В. Романов, М. А. Никулин. – Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2022. – 148 с. – URL<http://www.tsaa.ru/documents/publications/2022/amelchugov.pdf>. – Текст : электронный.

В пособии рассмотрено горение древостоя при пожаре, горение древесины в строительных конструкциях. Описаны особенности поведения деревянных строительных конструкций при пожаре. Учебное пособие включает в себя: описание повторяемости лесных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока, описание теплофизических свойств древесины, описание способов огнезащиты несущих деревянных строительных конструкций, рисунки, список рекомендуемой литературы.

Учебное пособие предназначено для подготовки курсантов, слушателей и студентов, обучающихся в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования по специальностям 20.05.01, 40.05.03 и направлениям подготовки 20.03.01, 20.04.01.

Учебное пособие рекомендовано к изданию методической комиссией Инженерно-технологического института ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья (протокол № 5 от 21 апреля 2022г.)

Текстовое (символьное) электронное издание

© С. П. Амельчугов, Р. Г. Шубкин, А. В. Антонов, С. В. Романов,
М. А. Никулин, 2022

© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1. ГОРЕНИЕ ДРЕВОСТОЯ ПРИ ПОЖАРЕ | 12 |
| 2. ИТЕРАТИВНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ | 26 |
| 3. ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПОЖАРАХ В ЗДАНИЯХ | 30 |
| 4. ОГНЕСТОЙКОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ | 54 |
| 5. ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ | 96 |
| 6. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ | 114 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ | 137 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 139 |

ВВЕДЕНИЕ

Древесина издавна используется человечеством в качестве строительного материала.

К достоинствам древесины следует отнести: легкость добычи, богатую сырьевую базу; простоту обработки и соединения; невысокую стоимость; высокую относительную прочность (отношение предела прочности на сжатие, изгиб к объемной массе материала), её величина прочности значительно выше, чем у стали, бетона, кирпича; малую теплопроводность – ниже, чем у стали примерно в 400 раз, в 10-12 раз меньше, чем у железобетона и в 5-7 раз ниже, чем у кирпича, это позволяет использовать древесину в качестве теплоизоляционного материала; малую температурную деформацию.

У древесины существуют и недостатки: анизотропность (неоднородность) строения приводит к существенному различию характеристик древесины (прочности, теплопроводности и др.) в направлениях вдоль и поперек волокон; наличие пороков (сучки, трещины, искривления и т.д.), приводящее к значительной нестабильности свойств древесины; гигроскопичность древесины существенно влияет на ее характеристики, а также размеры и форму, склонность к гниению, повреждению различными насекомыми, что приводит к снижению механических свойств и горючести.

Наиболее широкое применение в современном строительстве нашли хвойные породы (ввиду большей распространенности и лучшего качества древесины). Лиственные породы (осина, береза, ольха, липа, тополь) в основном применяются для постройки временных зданий, оград. Их также используют для изготовления дверей, наличников, перегородок, опалубки при бетонных работах.

Сортамент лесоматериалов состоит из следующих видов изделий: круглые, в виде бревен; пиломатериалы (доски, бруски, шпалы); изделия для пола (паркет, торцовая шашка); изделия для кровли (дрань, щепа); погонажные детали

(плинтусы, наличники для окон и дверей, поручни); клееные деревянные конструкции; элементы для сборного домостроения; фанера; пластмассы, содержащие древесный наполнитель (ДВП, ДСП); конструкции из профилированного бруса; конструкции с использованием плит клееных из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев; конструкции из дощато-гвоздевых плит (технология МНМ); конструкции с использованием плит древесных с ориентированной стружкой (ОСП, OSB); древесные пластики (листовые материалы, состоящие из шпона, пропитанные синтетическими смолами и затем склеенные в процессе термообработки под давлением).

Производство новых индустриальных изделий из древесины (фанеры, ДВП, ДСП, клееных конструкций) позволяет использовать неделовую древесину и отходы лесопильных и деревообрабатывающих предприятий, что является основным источником экономии лесных материалов в строительстве. Дело в том, что в нашей стране ежегодно заготавливают более 280 млн. м³ деловой древесины, а на различных стадиях ее переработки образуется около 120 млн. м³ отходов.

Важнейшим для строительства зданий показателем способности древесины аккумулировать теплоту, является удельная теплоемкость C представляющая собой количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть 1 кг материала на 1 К (или на 1 °С).

Поскольку состав древесного вещества у всех пород одинаков, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и при температуре 0 °С для абсолютно сухой древесины равна 1,55 кДж/(кг·°С). С повышением температуры удельная теплоемкость древесины несколько возрастает по линейному закону и при 100 °С увеличивается примерно на 25 %. Значительно сильнее влияет на теплоемкость увлажнение древесины. Так, увеличение влажности древесины от 0 до 130 % приводит к повышению теплоемкости примерно в 2 раза.

Показателем интенсивности переноса теплоты в материале является коэффициент теплопроводности λ , который численно равен количеству теплоты,

проходящей в единицу времени через стенку из древесины площадью 1 м^2 и толщиной 1 м при разности температур на противоположных сторонах стенки в $1 \text{ }^\circ\text{С}$. Коэффициент теплопроводности измеряется в $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Коэффициент λ повышается с увеличением плотности, влажности и положительной температуры (во влажной и сырой древесине); он примерно в 2 раза больше вдоль волокон, чем поперек, причем у пород с хорошо развитыми сердцевинными лучами в радиальном направлении λ несколько больше, чем в тангенциальном. При изменении плотности от 350 до $600 \text{ кг}/\text{м}^3$ λ возрастает в 1,8 раза. Чем выше ρ_0 , тем сильнее ее влияние на теплопроводность древесины.

Показателем способности древесины выравнивать температуру является коэффициент температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$, который представляет собой отношение коэффициента теплопроводности к теплоемкости единицы объема древесины. Увеличение содержания связанной воды в древесине почти не отражается на коэффициенте температуропроводности, так как его значения у древесинного вещества и воды довольно близки. Однако повышение содержания свободной воды, у которой коэффициент a примерно в 100 раз меньше, чем у замещаемого ею воздуха в полостях клеток, приводит к резкому снижению температуропроводности древесины.

При нагревании твердых материалов, в том числе и древесины, происходит увеличение их объема. Коэффициент линейного теплового расширения α показывает на сколько изменяется единица длины тела при нагревании его на $1 \text{ }^\circ\text{С}$. Наименьший α в направлении вдоль волокон; величина его для сухой древесины колеблется в пределах $(2,5-5,4)\cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{С}$. Тепловое расширение поперек волокон значительно больше (иногда в 10-15 раз), чем вдоль волокон, причем в тангенциальном направлении оно обычно в 1,5-1,8 раза выше, чем в радиальном. Коэффициент линейного расширения вдоль волокон древесины составляет $1/10-1/3$ коэффициентов теплового расширения стекла, бетона и металлов. При нагревании влажной древесины одновременно

происходит усушка, которая маскирует в десятки раз меньшее тепловое расширение древесины поперек волокон.

Показатели, характеризующие тепловые свойства древесины, используются для расчета процессов ее нагревания, сушки, оттаивания, замораживания, потерь теплоты через ограждения из древесины.

Древесина весьма чувствительна к нагреву. Уже при температуре материала порядка 110°C (383К) начинается ее разложение, сопровождающееся выделением летучих веществ, что можно обнаружить по характерному запаху.

При температурах 110-150°C (383-423К) происходит выделение из древесины, в основном, негорючих продуктов разложения (вода, углекислый газ), что сопровождается изменением цвета древесины (она желтеет).

При температурах 150-200°C (423-473К) древесина начинает обугливаться, приобретая коричневую окраску. Газы, выделяющиеся при этом, являются горючими и состоят в основном из окиси углерода, водорода и паров органических веществ. Однако выделяющихся продуктов разложения недостаточно, чтобы образовалась горючая смесь и началось пламенное горение. Это возможно лишь при более высоких температурах.

При 250-300°C (623-673К) происходит воспламенение продуктов разложения древесины.

Идеальная схема разложения древесины:



Для горения, как известно, необходимы 3 основных условия:

- наличие горючего материала (в данном случае древесины);
- наличие источника зажигания (воспламенения), способного нагреть древесину до температуры 250-300°C (523-573К);
- наличие окислителя, т.е. беспрепятственного доступа воздуха в зону горения.

Процесс горения древесины протекает в две стадии:

- пламенное горение продуктов разложения;
- тление образующегося угля.

Однако основное свойство, горючесть древесины, весьма ограничивает применение древесины в строительстве.

Пожары в поселениях с преобладающей деревянной застройкой, особенно в сочетании с ландшафтными пожарами [1], наносят большой ущерб.

Лесные пожары, на протяжении веков выполнявшие роль регулирующего фактора лесных экосистем, в современных условиях являются скорее катастрофическим событием с разных точек зрения: экономической, социальной, экологической. Экономический ущерб от потерь поврежденной огнем древесины сопровождается затратами на тушение пожаров. Экологический ущерб выражается в гибели естественных местообитаний растений и животных, ухудшении средообразующих функций природной среды, выделений большого объема парниковых газов в атмосферу.

Крупномасштабные лесные пожары, требующие мобилизации значительных средств на борьбу с ними, возникают периодически. Поэтому, прогнозирование их возникновения возможно и целесообразно со всех точек зрения. Информация о грядущей повышенной пожарной опасности позволит заранее привести в готовность имеющиеся средства и силы пожаротушения и минимизировать описанные выше ущербы.

Процессы, происходящие в лесах, обладают итеративностью, т.е. достаточно однотипной повторяемостью во времени. В практическом смысле это проявляется в цикличности явления, в нашем случае - лесных пожаров. Чем больший временной промежуток привлекается для анализа, тем точнее будут установлены причины и размерность итеративности возникновения лесных пожаров. Отсюда становится ясной необходимость ретроспективного

восстановления хронологии лесных пожаров за максимально большой срок времени.

Строительные конструкции зданий и сооружений, выполненные из дерева, являются одним из компонентов горючей системы, способствующей распространению пожара.

Общество реагирует на обстановку с пожарами принятием дополнительных нормативных ограничений, что привело к созданию достаточно сложной модели противопожарной защиты населенного пункта [2]. Зачастую застройщики при строительстве деревянных зданий и сооружений не могут преодолеть ограничения установленных норм пожарной опасности, прежде всего по экономическим причинам. Между тем, развитие технологий деревянного домостроения, в том числе огнестойкого, создание новых способов обнаружения пожаров, приемов реагирования на возникающие пожары, совершенствование технических средств спасания людей от пожара и т.д., создают предпосылки для смягчения требований нормативных документов в области пожарной безопасности. Введение норм технического регулирования и принятие технических регламентов, устанавливающих требования на основе исследования пожарного риска [5], в корне изменило принципы противопожарного нормирования безопасности зданий и сооружений.

На сегодняшний день деревянные конструкции, элементы конструкции и изготавливаемые из дерева детали узловых соединений составляют до 25% стоимости материалов в мировом строительстве (см. рис. 1.) По аналитическим данным статистических компаний США себестоимость возведения металлического каркаса аналогичной расчетной схемы выше в 1,5 раза, железобетонного – в 3,1 раза.

Одним из наиболее продвинутых в технологичном плане вариантов конструктивного решения является клееная древесина. Клееная древесина по

сравнению с применением цельных деревянных элементов конструкций имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- повышенная прочность по сравнению с цельными деревянными элементами за счет сочетания свойств клея и дерева;
- отсутствие напряжений, возникающих в результате усушки древесины;
- улучшенная теплоизоляция;
- повышенная огнестойкость за счет возможности применения специальных огнестойких клеевых составов;
- уменьшенная усадка в результате усушки древесины.

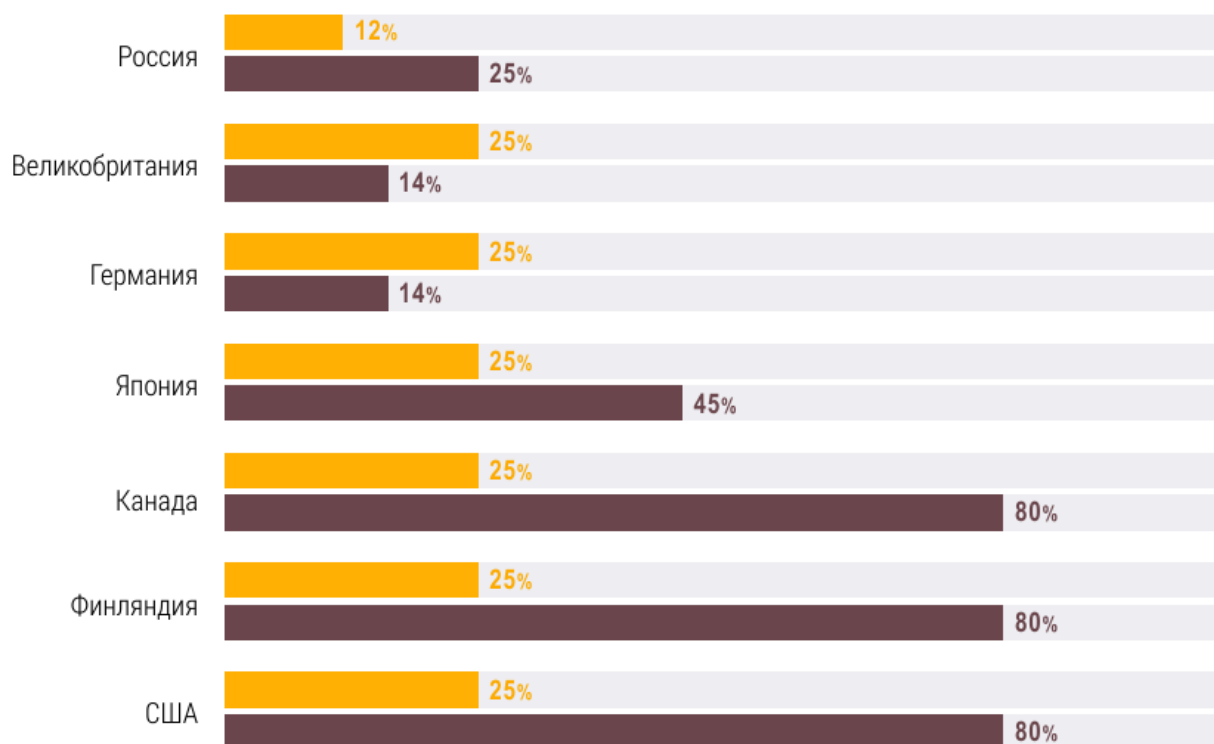




Рисунок 1 – Процентное соотношение стоимости деревянного объема строительства в общем объеме строительства/ этажном строительстве 

Однако существуют и отрицательные стороны применения инженерной древесины. Основной проблемой является увеличение трудоемкости при производстве клееных конструкций непосредственно на строительной площадке,

что влечет за собой существенное увеличение стоимости производства строительных конструкций из инженерной древесины. Данная проблема решается при помощи заводского изготовления клееных элементов конструкций и поставке на строительную площадку готовых элементов как в виде отдельных элементов строительных конструкций, так и сборных модулей, например, таких, как CLT-панели.

Применение готовых клееных конструкций позволяет уменьшить не только стоимость производства и строительства в целом, трудоемкость, но и, по совокупности всех факторов, сроки строительства и проведения строительно-монтажных работ по реконструкции и капитальному ремонту зданий и сооружений.

По совокупности всех вышеописанных факторов можно утверждать, что применение конструкций из инженерной древесины является прогрессивным методом строительства и имеет хорошую перспективу по развитию данной отрасли строительства.

1.ГОРЕНИЕ ДРЕВОСТОЯ ПРИ ЛЕСНОМ ПОЖАРЕ

Ежегодно, на активно охраняемой территории лесного фонда России возникает от 12 до 36 тысяч пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 5,2 млн.га. Изучение лесных пожаров - проблема, имеющая как фундаментальное, так и прикладное значение. Данная ситуация позволяет провести анализ влияния лесных пожаров на динамику лесного покрова и сукцессию лесных экосистем, оценка возможных выбросов углекислоты, аэрозолей, твердых и газообразных веществ в атмосферу, разработка методов пирологического районирования и оценки пожарной опасности территории. В этом направлении в лесах Сибири проделан большой комплекс исследований. В настоящее время чрезвычайно важным представляются исследования по истории лесных пожаров для прогнозирования частоты их возникновения в тех или иных регионах при ожидаемых глобальных изменениях климата. Сведения о частоте и интенсивности лесных пожаров в прошлом имеют прямую связь с планами организации лесоохраны. В последние десятилетия произошло резкое увеличение числа и масштабов лесных пожаров на территории страны. Крупными лесными пожарами принято считать пожары площадью более 200 га.

Если сравнивать среднегодовые данные Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации по динамике лесной площади, пройденной лесными пожарами за последние 30 лет, то можно обнаружить следующую тенденцию - в последние пять лет количество лесных пожаров увеличилось на 20 %, среднегодовая лесная площадь, пройденная огнем, возросла в 2 с лишним раза, а средняя площадь одного пожара увеличилась в 1,8 раз. Наряду с возрастанием площадей пожаров, существенным образом возрастает их интенсивность и распространение на обычно не горящие торфяные почвы. Согласно некоторым моделям, если ожидаемые климатические изменения будут иметь место и существующая система охраны лесов от пожаров не будет улучшена коренным образом, хвойные леса бореальной зоны в течение нынешнего столетия будут

уничтожены лесными пожарами с вероятностью, близкой к единице. Возможность реализации этой вероятности подтверждает уже произошедшая под действием пожаров замена темнохвойной тайги на сосняки в Приангарье. Такое событие произошло в результате пожаров около 400-300 лет назад, после появления здесь поселенцев. Пожары, выступая в качестве своеобразного экологического фактора, способствовали широкой экспансии светлохвойных лесов [36].

К такому повороту событий необходимо быть готовыми и попытаться хотя бы в первом приближении оценить вероятность возникновения крупномасштабных пожаров в конкретных регионах, т.е. попытаться спрогнозировать ситуацию.

На сегодняшнем этапе развития лесной пирологии и дендрохронологии представляется возможным с определенной долей достоверности спрогнозировать относительную вероятность возникновения пожара в той или иной части лесонасаждений. Это позволит концентрировать силы и средства для профилактики и тушения пожаров в определенном районе, добившись тем самым снижения финансовых затрат на охрану лесов от пожаров.

Имеющиеся повсеместно внедренные методы и способы борьбы с лесными пожарами основаны на всевозможных мерах по ограничению площади их распространения, своевременного их обнаружения и оперативного реагирования уже на факт пожара, а также совершенствование уже имеющихся способов тушения лесных пожаров. Принимаются также меры по ограничению доступа людей в леса в течение пожароопасного периода.

Весь комплекс этих мер не включает в себя прогнозирование, как меру борьбы с лесными пожарами. То есть, не учитывает ландшафтные возможности возникновения пожаров, очередность наступления пожарной зрелости, пожарные режимы в лесах, климатические особенности и горимость лесов за прошлые 1,5-2 столетия. Следует отметить, что сведения о сверхвековой истории лесных

пожаров редки, ввиду трудоемкости соответствующих полевых работ и исследований. В литературе известно всего четыре таких района, для которых собраны соответствующие данные. Это прежде всего районы Центральной Сибири.

Обсуждая возможность возникновения лесного пожара, следует отметить, что она будет изменяться в зависимости от породного состава леса. Вследствие того, что пожары не затрагивали некоторые ельники в течение их многовековой истории, последние сохранили на севере первобытный характер с типичным разновозрастным строением древостоя. Пожарная зрелость в ельниках в таежной зоне европейской части страны наступает при значительно более высоком комплексном показателе засухи, чем в сосняках. Он же подчеркивает, что под пологом насаждений темнохвойных пород, вследствие недостатка тепла, горючие материалы почти все время остаются влажными, поэтому такие насаждения менее пожароопасны. К этому можно добавить, что темнохвойные породы в целом требуют для своего развития устойчивой, достаточно высокой влажности приземного слоя воздуха. Елово-пихтовые леса Дальнего Востока характеризуются сравнительно невысокой пожарной опасностью.

Таким образом, очевидно, что экологические и морфологические особенности темнохвойной тайги во многих случаях предотвращают возможность возникновения в них пожаров.

Как известно, растительная масса лесного биогеоценоза образует структурный слой из горючих материалов, по которому и распространяется горение при пожаре.

Полнота сгорания лесных горючих материалов (ЛГМ), скорость распространения, особенности после пожарных повреждений древостоев и многие другие физико-химические характеристики горения зависят от свойств горючих материалов, от их количества, структуры и влажности.

К основным факторам, влияющим на процесс разложения органических остатков, относится мерзлотность почв. Вечная мерзлота в северной зоне замедляет скорость разложения подстилки, тогда как в зоне южной тайги только сезонное прогревание почв позволяет этим процессам протекать более интенсивно, не приводя к накоплению мертвой органики. Поэтому толщина подстилки в северной зоне на 1-2 сантиметра больше, чем в южной. Максимальное количество подстилки, достигающее $3,23 \text{ кг/м}^2$, выявлено в северной тайге, в лиственничнике кустарниково-зеленомошном. Этот запас вдвое превышает средний запас подстилки лиственничников южной тайги.

В среднем, преобладание запасов ЛГМ в северной тайге над южной составляет $2,9 \text{ кг/м}^2$. Для подзоны южной тайги характерны многоярусные насаждения с более высокими показателями полноты, чем в северной зоне.

Возникающие в таких насаждениях пожары, как следствие, очень интенсивны, а при наличии развитого травяно-кустарникового яруса и большого количества опада, пламя может подниматься по подросту и второму ярусу древостоя, приводя к развитию верхового пожара.

Анализ запасов ЛГМ в лиственничных насаждениях, находящихся на различных стадиях восстановительно-возрастной динамики, свидетельствует о постепенном увеличении массы ЛГМ напочвенного покрова в результате естественного восстановления растительности и отсутствия повторных пожаров, а также об увеличении их общих запасов с юга на север. Анализ состава горючих материалов показал, что в подзоне южной тайги велика доля опада, а в северной зоне - мхов в сочетании с подстилкой. Данные результаты важны для расчетов интенсивности пожаров и их последствий.

Пожарное созревание насаждений разных типов определяется особенностями комплекса горючих материалов и погодными условиями. Для установления пожарной зрелости насаждений в связи с ходом погоды используют

материалы наблюдений за влажностью горючих материалов и распространением горения на них.

Распространение горения при лесном пожаре возможно лишь в том случае, когда некоторой доли энергии, выделяющейся при горении определенного количества горючего, будет достаточно для воспламенения точно такого же или большего количества горючего. Применительно к комплексу горючих материалов это условие будет соответствовать пожарной зрелости. В основе очередности созревания лежит скорость высыхания горючих материалов. Так, влажность опада и подстилки по типам насаждений в один и тот же день существенно различаются. Она довольно последовательно увеличивается при переходе от типов с сухими почвами к типам с влажными и сырыми. В сосняках горючие материалы высыхают значительно быстрее, и пожарная зрелость у них наступает раньше, чем в ельниках. Очевидно, что замедленное высыхание горючих материалов в ельниках травяно-болотных объясняется увлажненностью торфяного горизонта почвы и повышенной влажностью приземного слоя воздуха.

Таким образом, пожарная зрелость комплекса горючих материалов непрерывно изменяется под влиянием метеорологических условий. Кроме того, в течение сезона развивается живой напочвенный покров, вследствие чего изменяются количественные соотношения различных групп горючих материалов, что так же оказывает влияние на пожарное созревание определенных участков.

Из этих данных следует, что рассматриваемые выше явления повторяются и для таежной территории закономерны.

Прогнозируемое глобальное потепление климата, как ожидается, приведет к увеличению частоты лесных пожаров, расширению их ареала и долгосрочной деградации лесорастительных условий, что может пагубно сказаться как на экологической, так и социальной безопасности людей во всех лесорастительных зонах.

На территории Сибири выделяют два полярно различных пожарных режима в лесах. Это леса Западной Сибири и леса Восточной Сибири. Редкая повторяемость пожаров определяет пожарный режим заболоченности темнохвойных лесов Западной Сибири. И наоборот, высокая горимость и частая повторяемость пожаров присуща низкогорным светлохвойным лесам Восточной Сибири.

Возникновение крупных лесных пожаров на территории от Урала до Тихого океана определяется повышенной частотой засушливых лет и большим разнообразием растительности с преобладанием светлохвойных лесов.

Наибольшее число пожаров (83%) возникает на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока и лишь 17 % в районах Западной Сибири.

В Западной Сибири крупные лесные пожары возникают один раз в 2-3 года, а вспышки их повторяются 1-2 раза в десятилетие. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке крупные пожары возникают ежегодно, но вспышки их наблюдаются раз в 3-4 года, часто повторяются в одном и том же регионе 2-3 года подряд [37].

Под влиянием региональных климатических и эколого-фитоценологических условий в Сибири формируются три типа пожароопасных сезона:

1. Короткий непрерывный - в северной и средней тайге, когда горимость лесов очень высокая в течение 1-3 летних месяцев.
2. Продолжительный - когда опасность горимости периодически возникает в течении 4-6 месяцев (типичен для южной тайги).
3. Двойной - 5-7 месяцев, с короткими весенними и осенними максимумами горимости (характерен для южных горных регионов).

Экстремальные пожароопасные сезоны в Западной Сибири формируются под влиянием антициклонов с европейской части континента (редко), Поволжья, Средней Азии, северной части Средней Сибири, реже Монголии. На территории Восточной Сибири экстремальные сезоны возникают под влиянием

антициклонов центральной Якутии, Монголии, Забайкалья, Северного Китая. В южных районах теплый сухой воздух выносится из Средней Азии. В Приморье экстремальную пожарную погоду определяют антициклоны и теплые циклоны из внутреннего Китая центральной Монголии.

На основе районирования территории Сибири и Дальнего Востока по условиям возникновения крупных лесных пожаров дана характеристика этих пожаров.

В каждой из шести лесопожарных зон имеются области с повышенной напряженностью пожарных режимов: в субарктической зоне – Индигиро-Колымская область, Западно-Сибирской - Зауральская и Обь-Енисейская, Восточно-Сибирской - Якутская, Приангарская, Забайкальская, в Дальневосточной зоне - Амуро-Приморская область.

Для Средней Сибири в сосново-лиственных лесах частота пожаров увеличивается с севера на юг, хотя имеются аномальные районы с повышенной горимостью и в северных лесах. Это связано с длительностью пожароопасного периода, а также с природными и антропогенными источниками огня. Под влиянием этих факторов в Приенисейской части северных лесов периодичность пожаров варьирует от 27 до 200 лет, в восточной - от 20 до 60. В среднетаежных лесах в области периодичность пожаров от 17 до 77 лет, что объясняется большей континентальностью климата.

В Приангарье периодичность пожаров варьирует в северной части от 26 до 39 лет, а в южной части - от 2 до 34 лет.

В южных горных сосновых лесах Средней Сибири периодичность пожаров составляет от 6 до 11 лет, что точно совпадает с цикличностью атмосферного увлажнения территории.

Очень сложные и динамические пожарные режимы наблюдаются в районах промышленного освоения лесов, где возникает больше половины всех пожаров. Это связано в первую очередь с повышенной антропогенной нагрузкой,

интенсивной грозовой деятельностью и наличием больших площадей вырубок. Из-за большого заноса горючих материалов, превышающего естественный в 3-4 раза, пожарная опасность на протяжении нескольких лет сохраняется в течение 5-6 месяцев в сезоне. Обилие зеленой массы из трав и кустарников в летний период не снижают ее и пожары беспрепятственно распространяются, переходя на окружающий древостой.

Анализ структуры пожароопасных сезонов в лесах России показывает, что доля дней с низкой пожарной опасностью (1 и 2 классы) составляет от 55 до 62 %, доля дней со средней пожарной опасностью (3 класс) - от 22 до 26%, и доля дней с высокой и чрезвычайной пожарной опасностью (4 и 5 классы) - от 14 до 20% длительности сезона. При этом на периоды низкой пожарной опасности приходилось от 10 до 20%, на периоды средней пожарной опасности от 30 до 39%, и на периоды высокой и чрезвычайной опасности от 44 до 54% всех возникающих лесных пожаров.

Экологические последствия лесных пожаров представляют большую опасность. Они сопровождаются большими эмиссиями CO_2 в атмосферу. Так, по данным Госкомстата России за период 1990-2003 гг. лесные пожары охватили более 20 млн.га лесопокрытой площади в России, в основном в зоне средней и южной тайги, и явились причиной прямых (в год пожара) эмиссий, оцениваемых в 240 Тг С год¹. По другим оценкам, в настоящее время в бореальных лесах Евразии в экстремальные годы число пожаров достигает 30 тыс., а площадь охватывает до 10 млн.га.

За период 1961-1997 гг. лесные земли России поглощали в среднем 240 ± 270 Тг CO_2 в год. Эмиссия углерода при пожарах за последнее десятилетие оказалась сопоставимой с годовым стоком углерода на всей покрытой лесом территории в России. Только в Средней Сибири ежегодная эмиссия углерода в результате пожаров в различных подзонах тайги оценивается следующим образом: в южной - 0,20 Тг С год, в средней - 1,17 Тг С год и в северной - 1,32 Тг

С год. Но это только разовые потери. Гораздо большее значение имеет то, что погибший при пожаре гектар леса не будет изымать из атмосферы около 1 тысячи тонн углерода ежегодно. Сосняк лишайниковый в южной подзоне средней тайги может аккумулировать в среднем 1,8 тонн углерода на гектар лесной площади. Легко посчитать, что только в результате лесных пожаров в Сибири за последнее десятилетие ежегодная ассимилирующая способность лесов снизилась примерно на 20- 25 ТгС/год, что составляет около 10% годового стока углерода в леса России. Еще раз отметим, что это очень заниженный расчет. В реальности, потери годового стока должны быть большими.

Высокая горимость лесов будет сохраняться в течение длительного переходного периода климатических изменений, пока через систему обратных связей не установится необходимое равновесие между климатом, растительностью и пожарами. По экспертной оценке, за счет перемещения зон растительности и распространения пожаров в суходольных и гидроморфных экосистемах масса ежегодно сгораемой органики в Средней Сибири может достигнуть 16 млн.т., против 5,4 млн.т. в настоящее время. Соответственно, в 3 раза возрастет и выброс двуокиси углерода и твердых аэрозольных частиц в атмосферу. Есть основания полагать, что эти процессы дадут дополнительный импульс процессу потепления климата.

При лесных пожарах полностью выгорает лесная подстилка. Ее масса меняется в зависимости от влажности в пределах 1,9-2,8 кг/м. Энергия сгорания лесной подстилки - это энергия тепловыделения в «чистом» виде. В процессе верховых пожаров выгорает примерно 10% древостоя. Количество тепловой энергии, выделяющейся при полном сгорании лесной подстилки массой 1,9-2,8 кг/м², или 1,9-2,8*10⁶ кг/км² и 10% древостоя, состоящего из свежей древесины с влажностью около 50%. Количество энергии, выделяющееся при сгорании такой древесины, составляет около 20,5*10 Дж/г или 2*10 Дж/кг. Если плотность древесины составляет 0,8 кг/дм², то количество энергии, выделившейся

при сгорании 1 м древесины, составляет $6,4-16 \cdot 10$ Дж/м. Объем древесины на площади 1 га варьирует от 27 до 660 м³/га, а бореальные леса Евразии имеют в среднем III бонитет [39]. При таком бонитете один ствол в среднем имеет диаметр 0,3 м и высоту около 25 м, а объем древесины составляет около 490 м³/га или $4,9 \cdot 10$ м³/км.

Отмечено, что при верховом пожаре выгорает примерно 10% древостоя, следовательно, для расчета выделившейся энергии принята величина $4,9 \cdot 10$ м³/км. Отсюда получается, что при сгорании древостоя на площади 1 км² выделяется $3,37,8 \cdot 10^{10}$ Дж тепловой энергии. Но при любом типе пожара практически полностью выгорает лесная подстилка. Поэтому к полученной величине тепловой энергии необходимо добавить то количество, которое выделяется при сгорании лесной подстилки на площади 1 км, то есть $1,5-6,4 \cdot 10$ Дж.

Таким образом, при лесном пожаре на площади 1 км² по порядку величин выделяется 10^{10} Дж тепловой энергии. Эта величина сопоставима с возникновением землетрясения с магнитудой $M_b=4$ по Рихтеру, но с той лишь разницей, что при землетрясении энергия выделяется почти мгновенно. Используя такой приблизительный расчет, можно составить энергетическую и эмпирическую шкалу для лесных пожаров. Для этого оценили выделившуюся энергию одного из самых больших лесных пожаров в Сибири, зарегистрированного в 1915 г. Тогда леса горели на площади $1,6 \cdot 10^6$ км². Энергия пожара могла составить $5,1 \cdot 10^{16} - 1,2 \cdot 10^{17}$ Дж, что эквивалентно энергии землетрясения > 7 по Рихтеру, но растянувшегося по времени на полгода.

Анализ горимости лесов Средней Сибири за многие десятилетия свидетельствует, что из всех факторов климатического режима при прочих равных условиях наибольшее влияние оказывает средняя температура за июнь-август. Разумеется, что на горимость лесов и после пожарную смену пород влияет комплекс факторов и вычленить строго определенную дозу летних температур достаточно сложно. Тем не менее, влияние этого фактора бесспорно, а

полученные результаты позволяют оценить ее относительный вклад в частоту повторяемости пожаров.

При детальном изучении климатических условий, ландшафта какой-либо местности, особенностей лесонасаждений, и выделении в них зон «пожарного созревания», и подкреплении этой информации сверхвековой историей лесных пожаров на исследуемой площади мы сможем установить периодичность возникновения лесных пожаров. Это позволит разработать соответствующие профилактические меры по защите лесной территории от огня. Такими мерами могут быть: ограничение допуска людей на определенную территорию в течение пожароопасного периода, создание мобильных отрядов (постов) для быстрой их передислокации в наиболее опасные районы по разработанной схеме, создание искусственных запасов огнетушащих веществ на наиболее опасной территории. Выделение наиболее опасных районов на карте лесонасаждений позволит также оптимизировать схему авиапатрулирования.

Во время интенсивных низовых пожаров на стволах деревьев образуются пожарные ранения - так называемые «пожарные подсушины». На участке ствола, где огнем был поврежден камбий, образуется рана, которая с годами может затягиваться, но след от нее навсегда остается внутри ствола дерева. Широкие подсушины остаются до конца жизни дерева незакрытыми. Иногда на стволах долгоживущих деревьев при часто повторяющихся пожарах насчитывается до полутора десятков пожарных подсушин разных лет (см. рис.2).

Пожарные подсушины по форме обычно удлиненные или треугольные с большей шириной внизу, имеются обуглившиеся участки коры и древесины. После образования подсушины резко изменяется ширина годичного кольца, что хорошо заметно на поперечном спиле, а на краю подсушины имеется черная корка, которая маркирует границу кольца, сформировавшегося в год пожара.



Рисунок 2 - Поперечный спил сосны с множественными пожарными ранениями

Кроме того, у деревьев после пожара происходит «редукция (депрессия) радиального прироста», т.е. снижение его величины из-за повреждения огнем корневой системы в течение ряда лет. После низовых пожаров высокой и средней интенсивности радиальный прирост у сосны снижается, причем его восстановление до нормального уровня происходит иногда более чем за 10 лет. Дату пожара можно определить путем обнаружения и датировки таких периодов (рисунок 3).

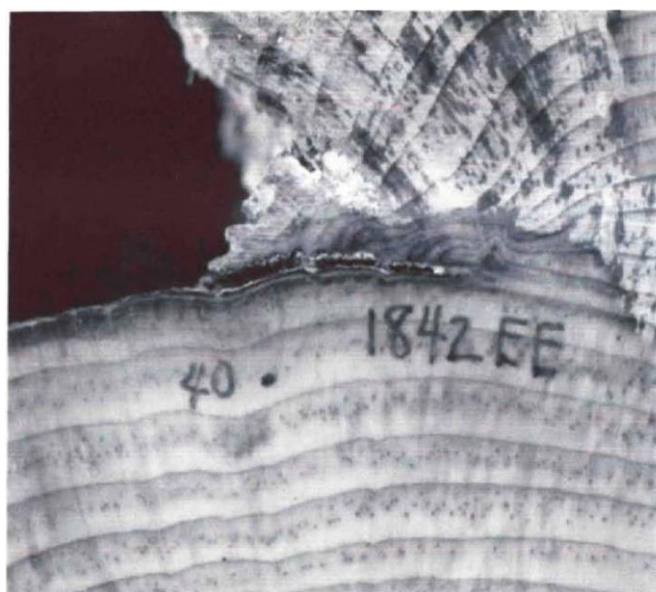


Рисунок 3 - Дата пожара, определенная по пожарной подсушине (Ольхон)

На рисунке 3 видно, что после резкого снижения ширины годовичных колец в год пожара, выход на средний уровень занял 5 лет. Негативное отклонение ширины годовичных колец составило 35.

На стволах березы по кромке гари на следующий год после пожара поселяется трутовый гриб *Daldinia concéntrica* (см. рис.4), а поперечный срез плодового тела гриба представлен на рисунке 5.



Рисунок 4 -Плодовые тела гриба *Daldinia concéntrica* на стволе березы



Рисунок 5 - Поперечный разрез гриба *Daldinia concentrica* (Район Братска)

2. ИТЕРАТИВНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В древостое встречается большое количество высоковозрастных деревьев с пожарными подсушинами разных возрастов. С этих деревьев отбираются буровые образцы древесины, по которым создается обобщенная хронология с о. Ольхон., пример которой приведен на рисунке 6. В результате анализа была получена следующая хронология лесных пожаров: 1996, 1993, 1990, 1987, 1978, 1976, 1969, 1964, 1959, 1955, 1952, 1950, 1946, 1943, 1940, 1930, 1923, 1916, 1913, 1911, 1902, 1900, 1898, 1895, 1889, 1887, 1884, 1879, 1877, 1874, 1863, 1853, 1848, 1837, 1828, 1825, 1823, 1806, 1804, 1798, 1793, 1788, 1786, 1784, 1776, 1770, 1766, 1762, 1758, 1753, 1747, 1743, 1735, 1724, 1713 гг. (См. рис. 6).

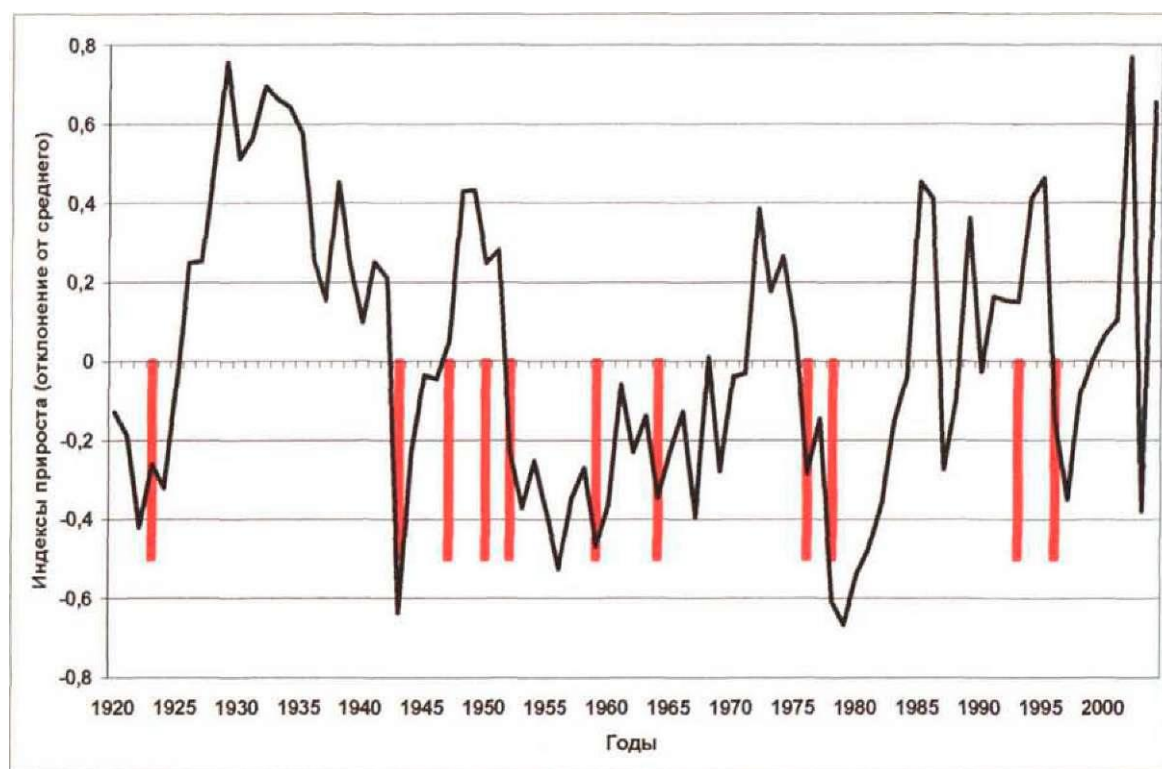


Рисунок 6 - Фрагмент древесно-кольцевой хронологии с о. Ольхон. Даты пожаров.

При сравнении графиков разных районов можно установить закономерность: до начала XX в. пожарные депрессии прироста по большей части имели разновременный характер, но в последнее столетие произошла

синхронизация пожаров. Если в предыдущие века совпадение депрессий прироста у этих хронологий было единичным в случае крупномасштабных пожаров, то в 20-м столетии регулярность таких совпадений резко возросла. Данное обстоятельство свидетельствует о выходе антропогенного фактора в число определяющих пожарный режим лесов вследствие значительного возрастания численности населения в регионе. В начале прошлого века здесь велось активное строительство Транссибирской железнодорожной магистрали. В рамках «столыпинской» аграрной реформы было переселено большое количество крестьян из средней европейской части России. В советский период регион был практически все время большой ударной стройкой, где работали огромные коллективы рабочих. Все это и вызвало изменение пожарной ситуации в лесах Байкальского региона. Если раньше при возникновении засушливых периодов для пожара было необходимо внешнее воздействие в виде, например, удара молнии, а это происходило редко, то в последнее столетие практически каждая пожароопасная ситуация стала реализовываться при содействии человека [36].

Кроме того, достаточно высокая синхронность лесных пожаров в разных регионах Сибири и Монголии дает основания для привлечения климатической информации в различном ее виде при верификации данных.

Сравнение хронологии с историческими сведениями по Сибири и Монголии за последние 500 лет, показало, что первые фрагментарные сведения о засухах и лесных пожарах можно обнаружить уже с начала XVII в., а со второй его половины количество такой информации существенно возрастает. Безусловно, исторические данные о лесных пожарах отличаются неполнотой. Поскольку в Сибири они традиционно воспринимались как рядовое явление, то в документах фиксировались только особо выдающиеся события. Исследователь Сибири В.Б.Шостакович (1924) писал по этому поводу: «Лесные палы для местного населения являются обычным делом и не вызывают у него удивления, а

тем более тревоги». Однако можно использовать информацию и о засухах, которые приводили к неурожаю и тем или иным способом отражены в истории. Особенно это характерно для Монголии, где засухи вызывали тяжелые последствия для сугубо животноводческой направленности этой страны.

Связь лесных пожаров с климатическими факторами

Ряд исследователей утверждают, что глобальное повышение температуры воздуха Земли приводит к росту длительности пожарного сезона в средних широтах.

Первые пожары в исследованных лесах приходятся на вторую декаду апреля, последние - на первую декаду октября. Пик весенней пожарной опасности наступает, как правило, в мае, когда происходит активное иссушение почвы и напочвенного покрова под действием ветров, которые в этот период характеризуются наибольшей частотой и достигают значительных скоростей, зачастую переходя в пыльные бури. Все это происходит на фоне незначительного количества осадков и низкой относительной влажности воздуха (не более 20%). При небольших осадках в июне, повышенная пожарная опасность продолжает сохраняться и в этом месяце. Пожары, возникающие в весенний и раннелетний период, имеют характер низовых пожаров средней (реже сильной) интенсивности. Число пожаров бывает велико, но поскольку они происходят в южных районах региона с развитой транспортной сетью, в большинстве случаев они ликвидируются достаточно оперативно и средняя площадь одного пожара не превышает 45-80 га.

Смещение пика горимости в отдельные годы из-за экстремально засушливых условий на июнь-июль приводит к резкому возрастанию выгоревших площадей. Во-первых, в этом случае преобладают низовые пожары сильной интенсивности, часто переходящие в верховые, во-вторых, горят не только южные леса, но и леса северных районов, где из-за неразвитости транспортной

сети затруднено использование техники при тушении пожаров. В этом случае средняя площадь одного пожара возрастает до 120-130 га.

Основное влияние климатического фактора на пожарную опасность складывается из двух моментов: типичного сезонного хода погоды, определяющего динамику фенологии растительности и сезонного изменения засушливости под влиянием погодных ситуаций. В пределах однородного по составу покрова растительности и, соответственно, фенотипам района, все факторы, кроме погодных, можно условно считать постоянными, т.е. изменение пожарной опасности связано только с погодными факторами.

Осенние осадки создают базу для большего прироста древесины в текущем году и только косвенным образом воздействуют на пожарную ситуацию текущего года. Повышенные же осадки в мае-июне снижают интенсивность и число пожарной депрессии прироста на протяжении древесно-кольцевой хронологии, а значит, напрямую воздействуют на возникновение и развитие пожарной ситуации в текущем году.

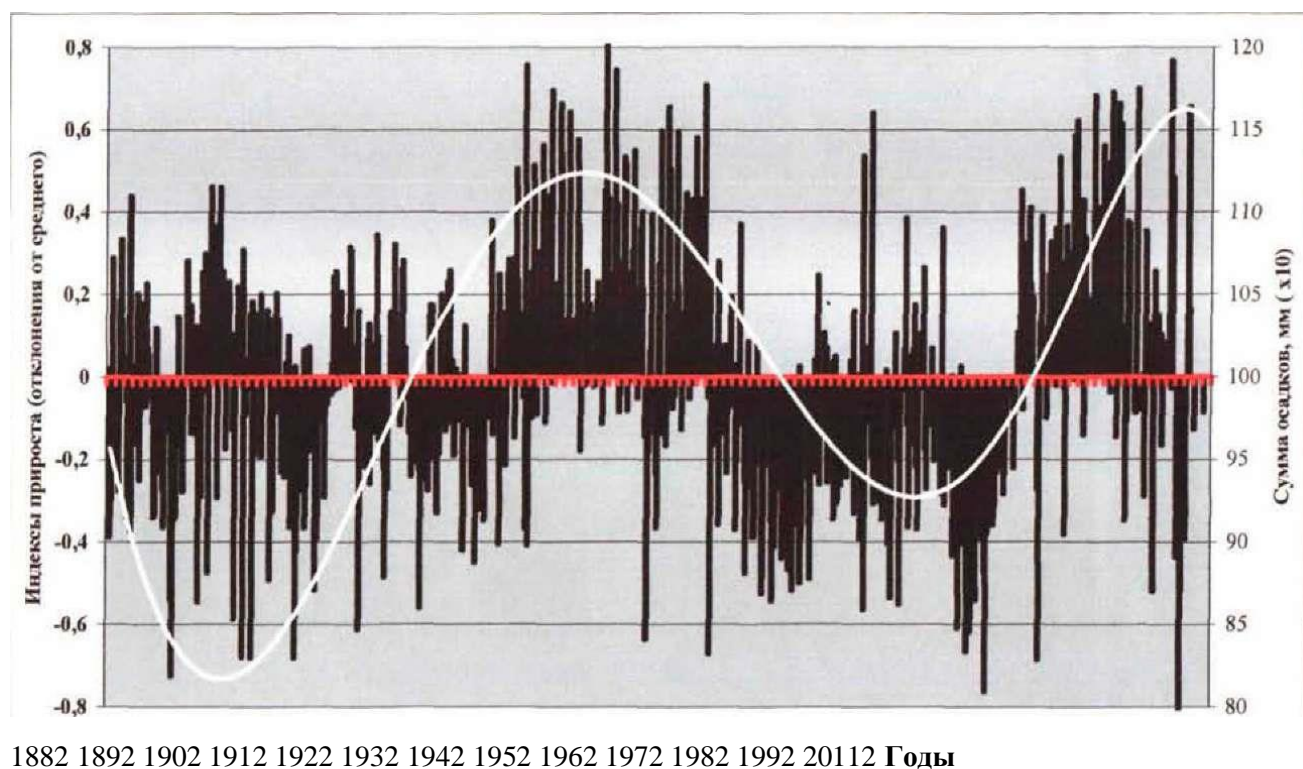


Рисунок 7 –График древесно-кольцевой хронологии

На рисунке 7 представлен сводный график ДКХ на фоне изменения выделенного доминирующего климатического фактора- суммы осадков мая-июня.

Можно заметить выраженную согласованную цикличность как в ширине годичных колец, так и в ходе атмосферного увлажнения.

Результаты как корреляционного, так и спектрального анализа демонстрируют зависимость возникновения лесных пожаров прежде всего от весенне-летнего увлажнения. Полученные отрицательные связи с температурой воздуха этого периода, в основном, статистически недостоверны. Данные расчета климатических функций отклика, рассчитанные С.Н.Андреевым (2001), также свидетельствуют о значимом влиянии осадков первой половины сезона роста (июнь) на радиальный прирост древесных растений на нижней границе леса.

Из анализа всех данных можно выделить следующие, наиболее важные циклы, определяющие динамику лесных пожаров в регионе: среди вековых- 60-летний (61-62 года) и среди внутривековых - 11 и 3-4 летние циклы. Для лиственничников северной тайги выделяются следующие величины межпожарных интервалов: 61 ± 8 лет и 139 ± 18 лет.

3. ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПОЖАРАХ В ЗДАНИЯХ

Основным недостатком древесины, снижающим её потребительские свойства в качестве строительного материала, является её горючесть.

Древесина весьма чувствительна к нагреву. Принципиально горение древесины аналогично горению полимеров и представляет собой гомогенный, диффузионный процесс превращения горючих веществ в продукты горения с выделением тепла и света. В основе горения лежит окислительно-восстановительная реакция. Знание факторов, влияющих на скорость реакции

горения, например, избыток или недостаток кислорода воздуха в зоне реакции, позволяет ею управлять.

В горении древесины есть необходимость подготовки вещества к горению (испарение, плавление, разложение) и выделении горючих паров. Воспламенение происходит при достижении концентрации горючих паров и газов нижнего концентрационного предела. Возникновение горения древесины выделяет следующие стадии воспламенения и горения древесины:

1) нагрев влажного вещества (температура древесины – до 50°C);

2) сушка древесины (удаление физически связанной воды) – температура до 120-150°C.

3) удаление внутрикапиллярной и химически связанной воды – температура 150-180°C.

Первые две стадии являются наиболее длительными и занимают порядка 55% от общей продолжительности воспламенения. Эти стадии происходят без разрушения вещества.

На третьей стадии происходит разложение наименее стойких компонентов древесины (люминовых кислот). Уже при температуре материала порядка 110°C (383К) начинается ее разложение, сопровождающееся выделением летучих веществ, что можно обнаружить по характерному запаху. Выделяются в основном негорючие газы и пары – CO₂ и H₂O, но имеется сравнительно небольшое количество горючих газов и паров, в частности монооксида углерода CO, углерод окисляется до монооксида углерода - $C + 0,5O_2 = CO$. Поэтому в продуктах горения всегда присутствует токсичный и пожаровзрывоопасный газ – CO (угарный газ). Процесс сопровождается изменением цвета древесины (она желтеет). На этой стадии имеется возможность самовозгорания древесины, процессы самовозгорания прежде всего связаны с твердофазными превращениями.

4) нагрев сухого материала и термическое разложение (пиролиз) древесины:

- начало пиролиза (температура 150-250 °С). При температурах 150-200°С (423-473К) древесина начинает обугливаться, приобретая коричневую окраску. Газы, выделяющиеся при этом, являются горючими и состоят в основном из окиси углерода, водорода и паров органических веществ. Однако выделяющихся продуктов разложения недостаточно, чтобы образовалась горючая смесь и началось пламенное горение. Это возможно лишь при более высоких температурах. Древесина при этой температуре превращается преимущественно в уголь (60-70 %). Паров и газов выделяется, в целом, немного, большинство из них негорючие – диоксид углерода CO_2 , пары воды H_2O , а также незначительное количество оксида углерода CO , метана CH_4 и др. С ростом температуры количество горючих газов и паров увеличивается. К концу этой стадии газоздушная смесь готова к воспламенению при наличии источника зажигания. Так, температура воспламенения сосновой древесины 255 °С, дубовой – 238 °С. При измельчении вещества температура его воспламенения уменьшается (например, температура воспламенения сосновых опилок – 196 °С). При отсутствии источника зажигания воспламенение газоздушной смеси не произойдет, однако при дальнейшем нагревании, при более высоких температурах (370-400 °С), произойдет самовоспламенение;

- интенсивное разложение древесины (температура 250-400 °С). При 250-300°С (523-573К) происходит воспламенение продуктов разложения древесины. На этой стадии целлюлоза превращается в основном в газообразные горючие продукты и выделяется основное количество горючих газов – порядка 40 % от их общего количества. Помимо перечисленных газов, выделяются водород H_2 , этилен C_2H_4 . Кроме них можно отметить пары спиртов, альдегидов, эфиров, кетонов и т. д. В целом, насчитывается более 350 наименований продуктов термического разложения и горения древесины. При разложении древесины возможны два пути: а) при температурах 180-250 °С она превращается, в

основном, в уголь; б) при температурах 280-400 °С выделяются преимущественно летучие продукты.

5) прекращение выхода летучих соединений и начало горения углеродистого остатка – древесного угля (температура 500-600 °С). Углеродистый остаток образуется на предыдущих стадиях, однако его горению препятствует то, что кислород воздуха не проникает к нему, поскольку сгорает в зоне пламенных реакций. При температуре выше 500 °С выход «летучих» практически прекращается и кислород получает доступ к поверхности углеродистого остатка (угля). С этого момента происходит одновременное гетерогенное горение (тление) угля и гомогенное горение продуктов разложения, продолжающих выходить через трещины из нижележащих слоев древесины. Толщина угля колеблется в пределах 2,5 см. Когда все слои древесины превращаются в уголь, выход газообразных продуктов разложения прекращается, а продолжается только горение угля.

Теплофизические свойства, влияющие на горение древесины представлены на рисунке 8. Коэффициент теплопроводности древесины находится в пределах $\lambda = 0,17 \dots 0,31$ Вт/м·К, удельная теплоемкость $C = 2,51$ кДж/кг·К. Коэффициент линейного температурного расширения у древесины (сосны) поперек волокон составляет $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-5}$, 1/К; параллельно волокон - $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-5}$, 1/К.

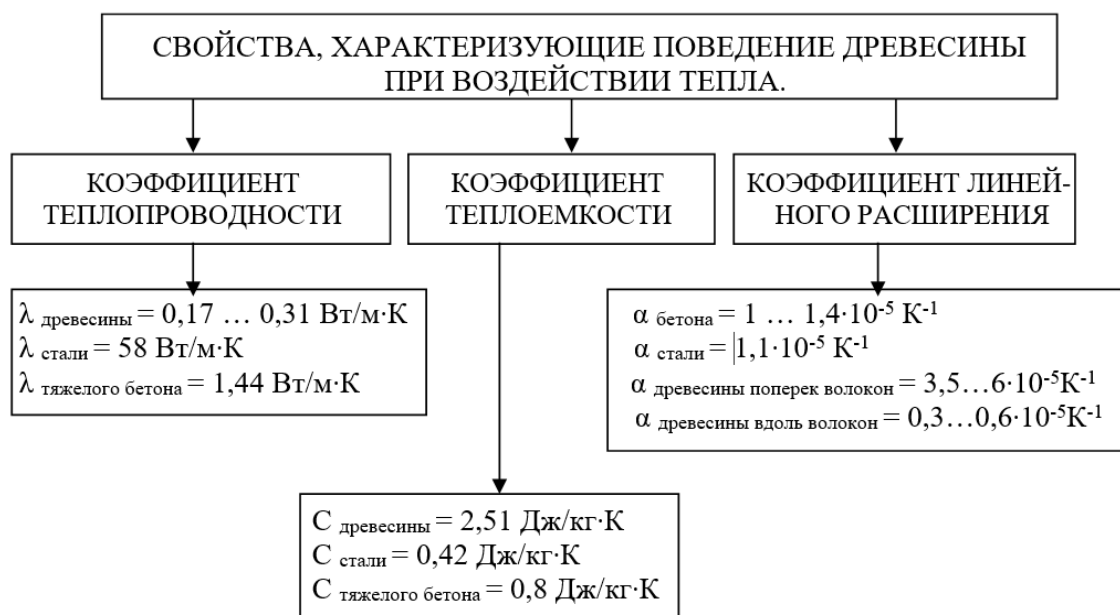
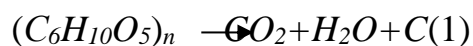


Рисунок 8 - Сравнительные характеристики теплофизических свойств древесины, стали и тяжелого бетона.

Идеальная схема разложения древесины:



Таким образом, для горения необходимы следующие 3 основных условия:

- 1) Наличие горючего материала (в данном случае древесина);
- 2) Наличие источника зажигания (воспламенения), способного нагреть древесину до температуры 250-300°С (523-573К);
- 3) Наличие окислителя, т.е. беспрепятственного доступа воздуха в зону горения.

Процесс горения древесины протекает в две стадии:

- 1) Пламенное горение продуктов разложения;
- 2) Тление образующегося угля.

Продуктами разложения древесины являются:

30-35% - уголь;

40-45% - жидкий дистиллят;

15-20% - газообразные вещества.

В условиях пожара до 60% тепла выделяется в период пламенного горения и около 40% - в период горения угля. В связи с этим, период пламенного горения в условиях пожара является определяющим, хотя занимает более короткий промежуток времени, чем фаза тления угля.

Массовая скорость выгорания древесины (потеря массы в единицу времени с единицы площади) в условиях пожара зависит от многих факторов: породы древесины, объемной массы (См. рис.9.), влагосодержания, площади удельной поверхности (См. рис.10.), температуры среды, доступа воздуха и т.д.

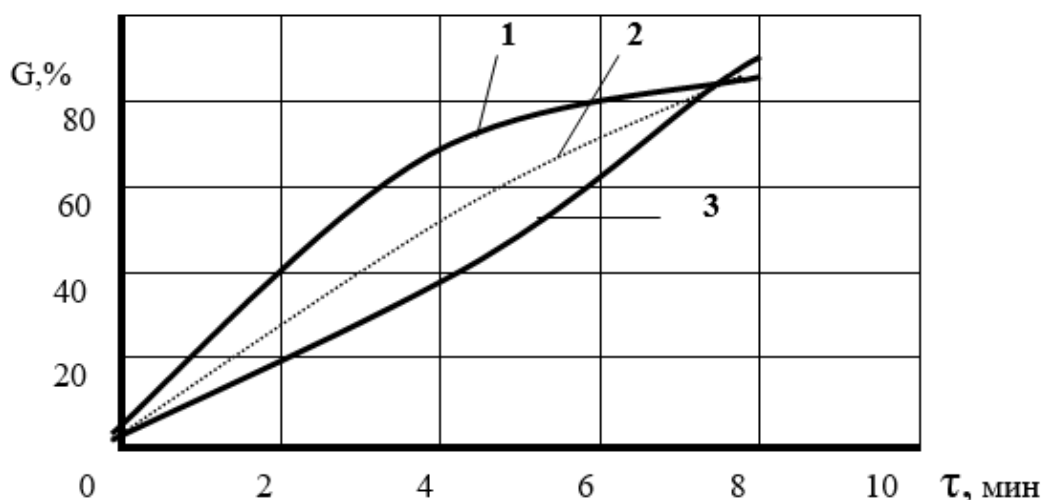


Рисунок 9 - Зависимость массовой скорости выгорания древесины от объемной массы. 1) $\rho_0 = 350$ кг/м³; 2) $\rho_0 = 540$ кг/м³; 3) $\rho_0 = 620$ кг/м³;

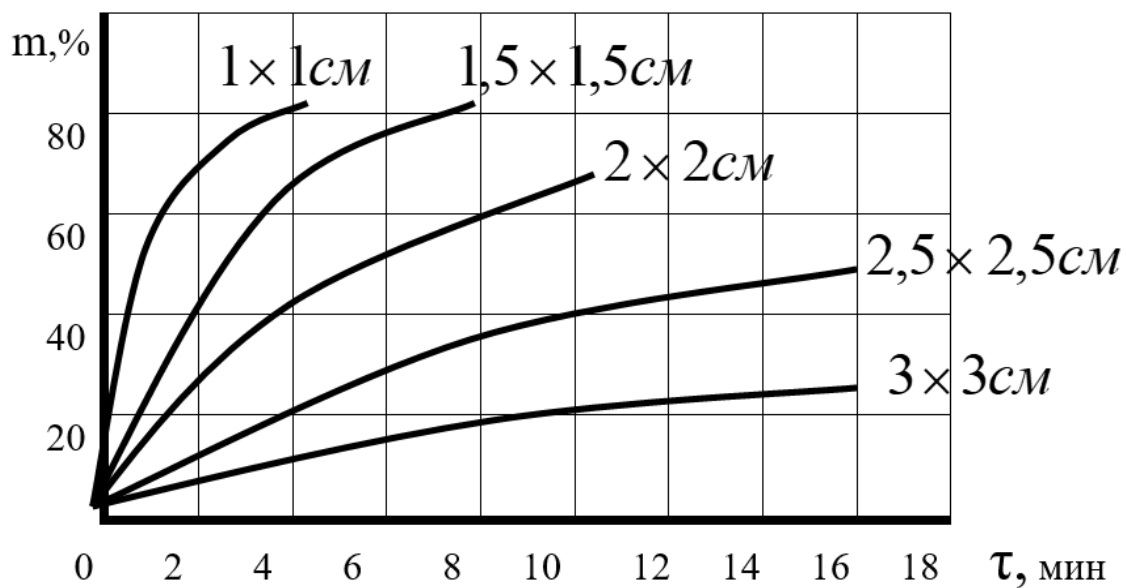


Рисунок 10 - Зависимость массовой скорости выгорания деревянных брусков от площади поперечного сечения, где m – потеря массы при огневом испытании, %; τ – время, мин.

Выгорание древесины во время пожара приводит к уменьшению сечения конструкции и снижению ее несущей способности.

Общие закономерности поведения древесины в условиях пожара представлены на рисунке 11.

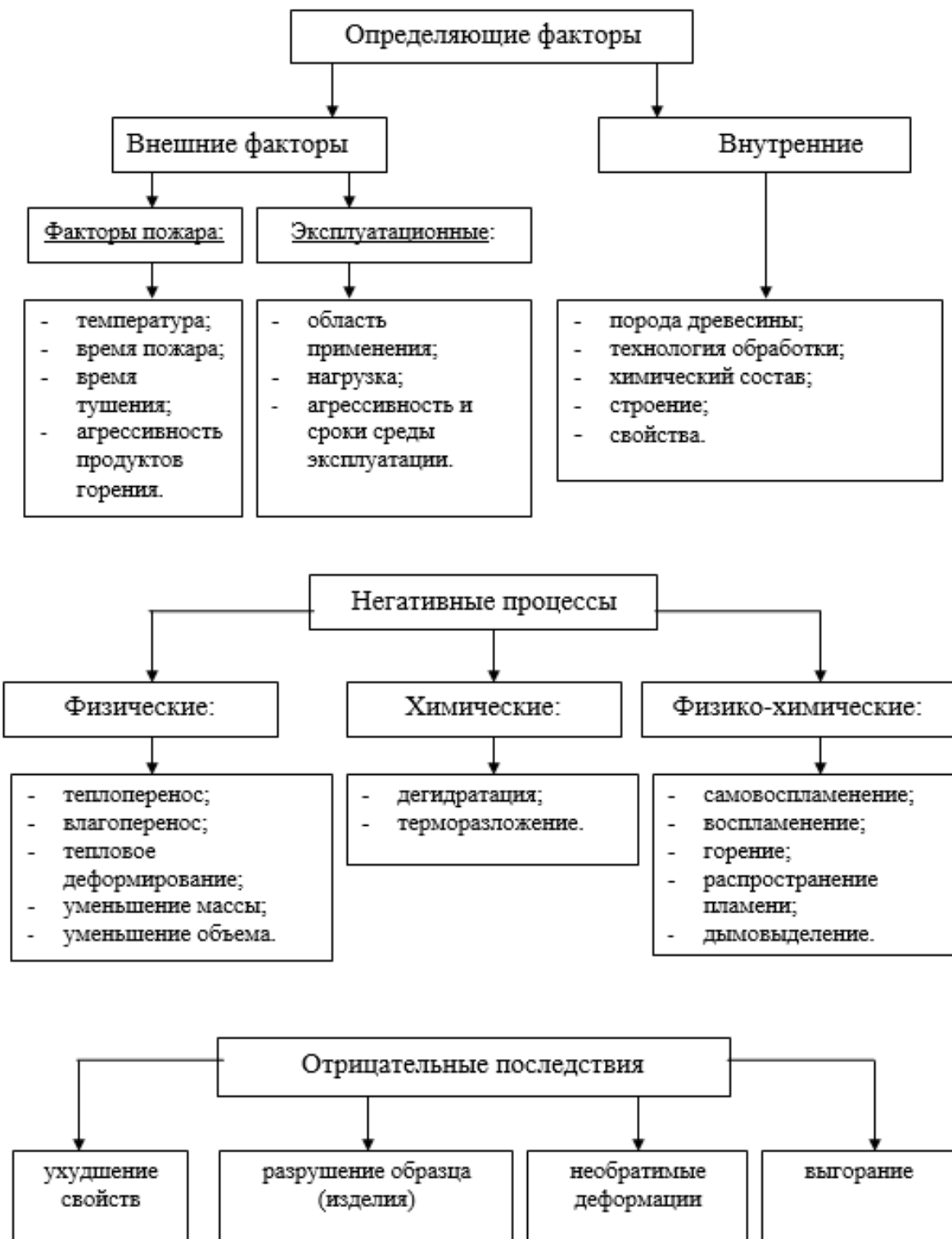


Рисунок 11 - Закономерности поведения древесины в условиях пожара

Нормативные требования в области пожарной безопасности деревянных зданий

Основные положения технического регулирования в области пожарной безопасности определяются Федеральным законом № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее – ФЗ-123) [6], который устанавливает общие требования пожарной безопасности к объектам защиты (продукции), в том числе к зданиям и сооружениям. Так, в зданиях и сооружениях должны применяться основные строительные конструкции с пределами огнестойкости и классами пожарной опасности, соответствующими требуемой степени огнестойкости зданий и сооружений и классу их конструктивной пожарной опасности.

Строительство одно- и двухэтажных деревянных жилых домов V степени огнестойкости в соответствии с СП 2.13130.2012 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» [7] допускается при наибольшей допустимой площади этажа 800 и 500 м², соответственно. Показатели огнестойкости строительных конструкций здания в этом случае не нормируются. При огнестойкости строительных конструкций не менее R(REI) 15 или E 15 допускается строительство трехэтажных жилых домов класса конструктивной пожарной опасности С2 и IV степени огнестойкости. При этом, строительные конструкции внутренних лестничных клеток должны иметь предел огнестойкости REI 45, а марши и площадки — предел огнестойкости R 15 и класс пожарной опасности К1.

В принципе, строительство жилых зданий в соответствии с требованиями свода правил допускается с применением любых конструкций при соблюдении требований к ним по классу конструктивной пожарной опасности и пределу огнестойкости, установленным техническим регламентом [6].

Аналогичные требования по допустимой высоте здания и площади этажа в пределах пожарного отсека в зависимости от степени огнестойкости и класса

конструктивной пожарной опасности приведены в СП 54.13330 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01» и СП 64.13330 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [20].

Наиболее развита нормативная база по строительству деревянных зданий в Северной Европе. Так, в Швеции использование деревянных конструкций в качестве несущих не ограничено, если они имеют соответствующие пределы огнестойкости. Применение незащищенных деревянных конструкций и материалов во внутренней и внешней отделке ограничено двумя этажами.

Датские строительные нормы допускают использование деревянных конструкций в четырехэтажных зданиях при наличии в них автоматических установок пожаротушения (АУПТ). Применение незащищенных деревянных конструкций внутри и снаружи здания возможно также только в двухэтажных зданиях.

В Норвегии строительство деревянных домов допускается до 4 этажей при огнестойкости строительных конструкций с пределом огнестойкости не менее R 60. При высоте более 4 этажей использование деревянных конструкций требует оценки пожарного риска и доказательной базы. В зависимости от площади пожарного отсека (200 м²) и этажности здания (4 этажа) имеются ограничения по применению строительных и отделочных материалов.

Противопожарными правилами Финляндии разрешается строительство четырехэтажных зданий жилого и нежилого фонда, имеющих деревянный каркас и деревянную фасадную обшивку, при условии выполнения ряда требований. В частности, обязательным требованием является оснащение таких зданий спринклерными установками пожаротушения. Для жилых зданий высотой до 2-х этажей это условие необязательно.

Между отдельно стоящими деревянными домами и подсобными помещениями рекомендуется устраивать противопожарные разрывы шириной не

менее 8 м. Если данное условие выполнить не удастся, то рекомендуется применять дополнительные меры по защите от распространения огня по территории: оборудование жилых помещений пожарной сигнализацией и средствами автоматического пожаротушения; установку пожарных гидрантов; устройство противопожарных преград между зданиями; монтаж противопожарных заполнений в оконных и дверных проемах наружных стен; устройство противопожарных разрывов на фасадах и карнизах зданий; посадку в разрывах между зданиями лиственных деревьев.

Минимальная ширина подъездных путей для пожарных машин составляет 3,5 метра, минимальная высота - 4 метра, радиус поворота - не менее 12 метров. Конструкция кровли зданий также должна предотвратить распространение огня на соседние строения. Распространение огня с карнизов в чердачные помещения в многоэтажных деревянных зданиях каркасной конструкции можно предотвратить при помощи устройства отдельной вентиляции наружной стены и чердака. При этом обязательно следует обеспечить необходимое вентилирование чердачного пространства, а также требуемую огнестойкость конструкции нижней части карниза. Это можно сделать при помощи вентилирования наружной стены из-под глухой нижней части карниза, а вентилирование чердака - из-под стрехи карниза (над водосточным желобом). Огнестойкость участка наружной стены, примыкающего к карнизу и чердачному пространству, желательно усилить обшивкой этого участка, например, гипсокартоном.

В Германии требования к деревянным строениям зависят от этажности. Так, в зданиях до 3-х этажей разрешено использовать незащищенные деревянные конструкции с пределами огнестойкости REI 30. В зданиях до 5-ти этажей допускается применять деревянные конструкции с пределами огнестойкости REI 60. При этом поверхности конструкций должны быть защищены негорючими материалами. Здания выше 5-ти этажей следует строить по специальным проектам, при этом предел огнестойкости конструкций должен быть не менее REI

90 с негорючей защитой K₂60. Для всех помещений зданий выше 5-ти этажей необходимо устройство АУПТ.

При строительстве многоэтажных деревянных домов в США строго соблюдают нормы деления здания на пожарные отсеки. Противопожарная стена с пределом огнестойкости 120 мин служит границей между участками площадью более 600 м². Пределы огнестойкости стен между квартирами и стен, граничащих с коридором, также составляют 120 мин. Допускается строительство шестиэтажных деревянных зданий при наличии АУПТ.

В данном направлении ведутся работы ассоциацией АРА – The Engineered Wood Association. Основными вопросами, которыми занимается данная ассоциация – изучение свойств древесины как материала и исследование строительных конструкций из инженерной древесины. Все исследования закреплены в виде стандартов проектирования конструкций из инженерной древесины и устанавливают правила проектирования, конструирования строительных конструкций и методы их изготовления, эксплуатации и различных испытаний, в том числе и по обеспечению противопожарной защиты.

Краткий анализ противопожарных требований к деревянным зданиям показывает, что основные ограничения связаны с этажностью и пределами огнестойкости несущих конструкций. При увеличении этажности, как правило, применяются АУПТ. Имеются серьезные ограничения по применению горючих материалов для внутренней и внешней отделки.

Общие принципы расчета огнестойкости строительных деревянных конструкций.

Суть расчета предела огнестойкости строительных конструкций заключается в определении времени, по истечении которого в условиях высокотемпературного воздействия при пожаре наступает одно из предельных состояний:

- потеря несущей способности (R);

- потеря целостности (E);
- потеря теплоизолирующей способности (I).

Для конструкций, выполняющих одновременно несущие и ограждающие функции, необходимо определить время от начала пожара до наступления предельного состояния по несущей и теплоизолирующей способностям, а за предел огнестойкости принять минимальное из полученных значений.

Расчет предела огнестойкости строительных конструкций состоит из двух частей: теплотехнической и статической (прочностной).

Теплотехническая часть имеет целью определить температурные поля в расчетном сечении элемента или конструкции при действии на них температурного режима пожара. При этом используются уравнения нестационарной теплопроводности твердого тела с учетом изменения теплофизических характеристик материалов, из которых выполнена конструкция, в зависимость от температуры. Решение теплотехнической части позволяет определить предел огнестойкости из условия наступления предельного состояния по теплоизолирующей способности, что характерно для ограждающих конструкций.

Для определения предела огнестойкости из условия наступления предельного состояния по несущей способности необходимо также выполнить статическую (прочностную) часть расчета. В статической части вычисляют несущую способность конструкций, нагреваемых при пожаре, с учетом изменения прочностных свойств материалов при высоких температурах.

В общем случае схема расчета предела огнестойкости конструкции по потере ее несущей способности показана на рисунке 12.

По оси абсцисс отложено время нагрева конструкции τ , а по оси ординат – несущая способность конструкции $N_{p,t}(M_{p,t})$ и величины внутренних силовых факторов в виде действующего усилия N_p (растяжения или сжатия) или изгибающего момента M_p от действия нормативной нагрузки.

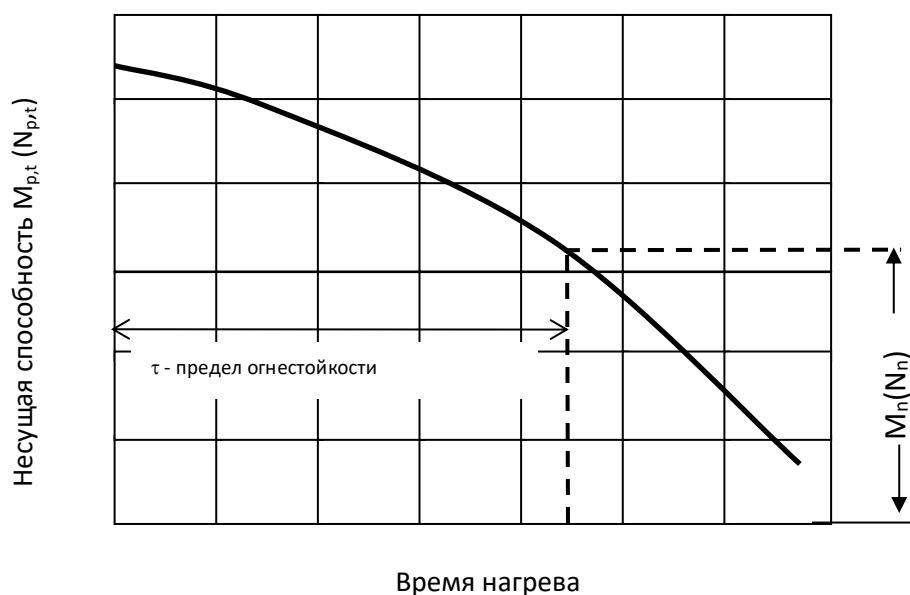


Рисунок 12 – Общая схема расчета предела огнестойкости по потере несущей способности конструкции

Для построения графика на рисунке 12 выполняется следующая последовательность расчета:

- задаются отдельными периодами времени нагрева конструкции;
- для заданных периодов времени теплотехническим расчетом определяют температуры в сечении конструкции;
- статическим расчетом для этих же промежутков времени определяют несущую способность конструкции с учетом изменения механических характеристик материала;
- строится график снижения несущей способности конструкции во времени;
- по графику определяется значение предела огнестойкости τ , т.е. времени, при достижении которого несущая способность конструкции снизится до величины внутренних рабочих напряжений от нормативной нагрузки.

Расчет предела огнестойкости строительных конструкций выполняется с учетом следующих допущений:

- расчету подвергается отдельно взятая конструкция или конструктивный элемент без учета связи с другими конструкциями, т.е. не учитывается совместная работа конструкций здания или сооружения;

- конструктивные элементы в условиях действия температурного режима, представленного в виде зависимости среднеобъемной температуры от времени, нагреваются одинаково по всей длине или высоте;

- утечками тепла по торцам конструкции пренебрегают;

- температурные напряжения в конструкции, появляющиеся в результате ее неравномерного прогрева и в силу изменения упругопластических свойств материала, не учитываются.

Пожарная опасность деревянных конструкций зависит от температуры воспламенения конкретной породы древесины или самовоспламенения измельченных древесных материалов, скорости выгорания и распространения пламени по поверхности, пространственной ориентации элементов конструкции, токсичности продуктов горения и пиролиза, огнестойкости конструкции. Имеют значение предельные параметры, характеризующие условия самоподдержания процесса горения, например, пожар происходит снаружи или внутри помещения.

Пожарная опасность строительных конструкций подразделяется на четыре класса, устанавливаемых ГОСТ 30403-2012: КО (непожароопасные); К1 (малопожароопасные); К2 (умеренно пожароопасные); К3 (пожароопасные) [12].

Одна и та же конструкция в зависимости от времени огневого воздействия может принадлежать к различным классам пожарной опасности. Например, КО(15) – конструкция класса пожарной опасности КО при времени огневого воздействия 15 мин, а К1(30) - конструкция класса пожарной опасности К1 при времени огневого воздействия 30 мин.

Под огнестойкостью строительных конструкций понимается их способность сохранять несущую и (или) ограждающую способность в процессе пожара.

Наиболее распространённым и надёжным методом определения предела огнестойкости является экспериментальный – огневые испытания. Многочисленные исследования реальных пожаров показали, что в их развитии можно выделить характерные этапы и стандартизировать режим «температура - время». В 1966 г. Международной организацией по стандартизации для испытания строительных конструкций по экспериментальному методу была введена стандартная температурная кривая для характеристики температурного режима пожара.

Проведенные исследования деревянных конструкций по данному методу однозначно свидетельствуют о том, что предел огнестойкости конструкций из массива дерева значительно выше предела огнестойкости многих обычных конструкций, в том числе металлических.

Известно, что определяющим при потере несущей способности конструкции (огнестойкости) во время пожара для стали является предел текучести, поэтому разрушающий изгибающий момент M_p можно определить по формуле (2):

$$M_p = R_y \cdot W_h, \quad (2)$$

где: R_y - предел текучести при температуре t , МПа;

W_h - момент сопротивления поперечного сечения, МПа.

Числовые значения временного сопротивления (предела прочности) различных материалов приведены в табл. 1.

Сталь превосходит по кратковременным прочностным свойствам древесину более чем в 3 раза, однако коэффициент теплопроводности - λ (Вт/м°C)

у древесины в 240 раз меньше, а удельная теплоемкость c (кДж/кг $^{\circ}$ С) больше почти в 6 раз (табл. 2).

Таблица 1 - Числовые значения предела прочности

| Материал | Временное сопротивление R, МПа, при: | | |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| | сжатии R _c | растяжении R _p | изгибе R _i |
| Торфоплиты | 0,5 | - | 0,25-0,2 |
| Бетон обыкновенный | 5-30 | 0,6-2 | - |
| Бетон высокопрочный | 40-80 | 2,5-7 | - |
| Кирпич глиняный | 7,5-30 | - | 1,5-3,5 |
| Древесина: | | | |
| - вдоль волокон | 50 | 130 | 100 |
| - поперек волокон | 6,5 | 6,5 | 75 |
| Гранит | 100-250 | 2-4,4 | - |
| Сталь | 380-450 | 380-450 | 380-450 |

Таблица 2 - Теплофизические характеристики строительных материалов

| Материал | λ , Вт/м $^{\circ}$ С | |
|------------------|-------------------------------|-----------|
| Пенопласты | 0,04-0,05 | -- |
| Минеральная вата | 0,05-0-09 | -- |
| Древесина | 0,24 | 2,42-2,75 |
| Кирпич глиняный | 0,8-0,85 | 0,8 |
| Тяжелый бетон | 1-1,5 | 0,8 |
| Гранит | 3-3,5 | 0,8 |
| Сталь | 58 | 0,42 |

При условии равнопрочности поперечного сечения деревянные элементы должны иметь больший момент сопротивления W_h , а, соответственно, и большие размеры, по сравнению с металлическими. Однако сама древесина обладает более низкой теплопроводностью, поэтому при пожаре прогрев её до критических значений не наступает, а предельные состояния деревянных конструкций лимитируются скоростью выгорания древесины. В то время как при пожаре стальная конструкция быстро прогревается по всему поперечному сечению, что приводит к её разрушению. В практике тушения пожаров принято, что разрушение металлических конструкций в среднем наступает через 15 минут.

Используемый для исследования пределов огнестойкости стандартный температурный режим, является усредненным:

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (3)$$

где T - температура в печи, соответствующая времени t , ° С; T_0 - температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), ° С; t - время, исчисляемое от начала испытания, мин.

За последние два десятилетия развитие технологий численного моделирования динамики пожара дает еще одну возможность получения температурного режима, учитывающего реальные условия пожара. Поэтому в процессе испытания и калибровки в испытательных печах должен создаваться такой режим, который будет соответствовать конкретным условиям. Это важно для уникальных, с разнообразной горючей загрузкой и большеобъемных зданий. Такой подход позволит на этапе проектирования рассчитывать огнестойкость деревянных конструкций с учетом тепловых воздействий возможных сценариев пожара (См. рис.13).

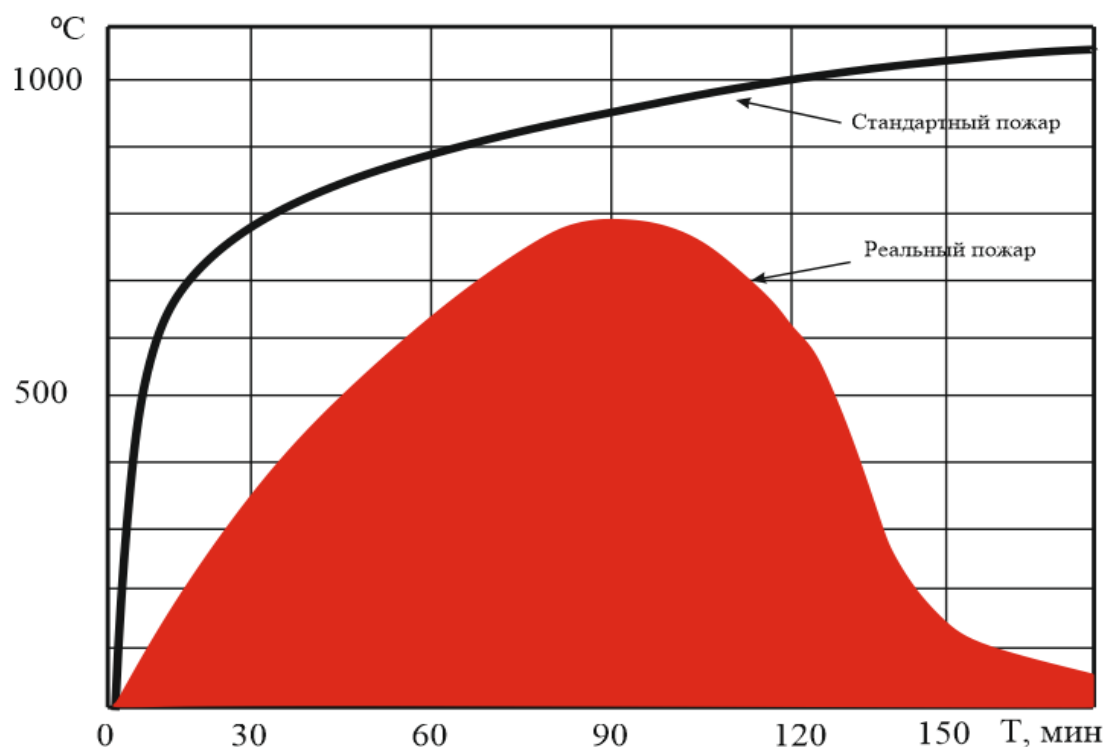


Рисунок 13 - Численное сравнение стандартного и реального пожаров на примере футбольного манежа

Массовая скорость выгорания древесины зависит от размеров поверхности, доступной для горения и характеризуется коэффициентом поверхности горения K_p ,

$$K_p = \frac{F_{пг}}{F_{пож}}, \quad (4)$$

где, $F_{пг}$ - площадь поверхности горения, m^2 ;

$F_{пож}$ - площадь пожара, m^2 .

Массовая скорость выгорания древесины (потеря массы в единицу времени с единицы площади) в условиях пожара зависит от многих факторов: породы древесины, объемной массы, влагосодержания, площади удельной поверхности, температуры среды, доступа воздуха и т.д.

Выгорание древесины во время пожара приводит к уменьшению сечения конструкции и снижению ее несущей способности.

Массовая скорость выгорания твердых материалов не является постоянной величиной. Она существенно зависит от условий горения, прежде всего от пространственного расположения элемента. При вертикальном или наклонном положении деревянного элемента он попадает в зону действия конвективных потоков пожара, что значительно увеличивает скорость выгорания.

Для деревянных конструкций важным элементом огнестойкости является их обугливание при пожаре и последующая потеря несущей способности (R) и целостности (E). Основными закономерностями, которые необходимы при этом, являются: температура начала обугливания древесины (270 °С), которая достигается на поверхности древесины через 4 мин после начала стандартного теплового воздействия пожара; условная скорость обугливания (скорость перемещения фронта обугливания), включающая влияние угловых закруглений (для древесины хвойных пород — 0,7 мм/мин).

Скорость обугливания при одностороннем обугливании принимается постоянной во времени. Расчетное значение глубины обугливания определяется по следующей формуле:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t, \quad (5)$$

где $d_{char,0}$ — расчетное значение глубины обугливания при одностороннем обугливании;

β_0 — расчетное значение скорости одностороннего обугливания при стандартном воздействии пожара;

t — продолжительность воздействия пожара.

Условная скорость обугливания учитывает влияние угловых закруглений и трещин. Расчетное значение условной глубины обугливания определяется по формуле 6

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t, \quad (6)$$

где $d_{char,n}$ — расчетное значение условной глубины обугливания, включая влияние угловых закруглений;

β_n — расчетное значение условной скорости обугливания, учитывающей влияние угловых закруглений и трещин.

Расчетные значения скорости обугливания при стандартном воздействии пожара для некоторых деревянных конструкций даны в табл. 3.

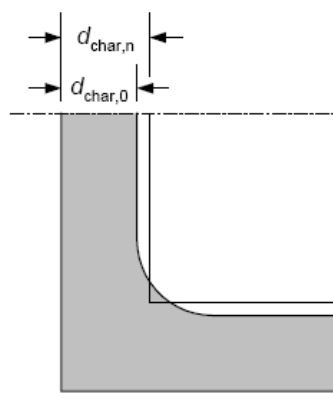


Рисунок 14 - Расчетная $d_{char,0}$ и условная $d_{char,n}$ глубина обугливания при одностороннем обугливании

Таблица 3 - Расчетные значения скорости обугливания β_n и β_0

| Материал | β_0 , мм/мин | β_n , мм/мин |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Клееная древесина хвойных пород с нормативной плотностью $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$ | 0,65 | 0,7 |
| Цельная древесина хвойных пород с нормативной плотностью $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$ | 0,65 | 0,8 |
| Цельная древесина или клееная древесина лиственных пород с нормативной плотностью $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$ | 0,65 | 0,7 |
| Цельная древесина или клееная древесина лиственных пород с нормативной плотностью $\rho \geq 450 \text{ кг/м}^3$ | 0,50 | 0,55 |

| | | |
|---|------|-----|
| Брус из клееного шпона с нормативной плотностью $\rho \geq 480 \text{ кг/м}^3$ | 0,65 | 0,7 |
| Деревянные панели | 0,9 | – |
| Клееная фанера | 1,0 | – |
| Древесные плиты, кроме клееной фанеры | 0,9 | – |

На огнестойкость деревянных конструкций наибольшее влияние оказывают узлы соединения элементов и деталей. В настоящее время применяют более 200 вариантов соединения деревянных элементов, такие как шиповые, торцевые соединения, "ласточкин хвост", на "ус", в паз и т.д. Для усиления узлов чаще всего применяются металлические гвозди, винты, скобы, болты, накладные и врезные пластины или уголки и т. д. При проведении огневых испытаний установлено, что именно эти элементы в деревянных конструкциях подвержены интенсивному прогреву. Это приводит к потере целостности (Е) и (или) потере теплоизолирующей способности соединений вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности узлов конструкции до предельных значений (I) и, следовательно, к снижению при пожаре прочности и целостности деревянной конструкции в целом. Вместе с тем, развитие технологии деревянного домостроения, прежде всего клеевых деревянных конструкций, привело к созданию ряда деревянных крепёжных элементов, которые в сочетании с огнестойкими клеями существенно улучшают характеристики соединительных узлов.

Еще одним фактором, способствующим распространению пожаров, являются оконные проемы. Во-первых, остекление не ограничивает лучистое излучение пожара (плотность теплового потока при пожаре - W). Во-вторых, на первых же минутах пожара остекление разрушается, что значительно изменяет характеристики теплообмена пожара в помещении. Вместе с тем, разрабатываемая концепция современного экодома предполагает устройство

ставень на окнах. Вполне очевидно, что при пожаре закрытые ставни, противопожарные шторы будут являться существенным барьером распространения пожара.

Массовые пожары, происходящие в поселениях с большим количеством деревянных зданий имеют общую закономерность. Они происходят при усилении ветра, в результате чего пламя пожара свободно перекрывает противопожарные разрывы между зданиями, а перенос искр достигает сотни метров, что приводит к «беглому огню». Так, при пожаре в г. Игарка в 1962 г., согласно описания пожара, наблюдался перенос горящих досок на расстояние более 800 метров. Одним из способов снижения вероятности массовых пожаров является повышение устойчивости ограждающих конструкций к огню. В ряде отраслей используется понятие «функциональная огнестойкость» - способность конструкции выдерживать внешнее воздействие опасных факторов пожара в течение заданного времени. Создание ограждающих конструкций с заданным функциональным пределом огнестойкости в зависимости от возможных тепловых нагрузок ландшафтного пожара позволит создать надежный барьер перехода внешнего пожара на здание.

Одним из проблемным мест в деревянных конструкциях являются пустоты и неплотности. Наибольшее количество пустот находится в конструкциях перекрытий. Часто встречающаяся проблема тушения пожара связана со сложностью проведения разведки и определения точного места ввода огнетушащих веществ. Наличие сквозных вентилируемых пространств способствует быстрому неконтролируемому развитию пожара, в результате чего подача огнетушащих веществ может быть запоздалой.

Изготовление деревянных конструкций из сырого материала в процессе эксплуатации здания приводит к последующему короблению, растрескиванию из-за усыхания. Это приводит к возникновению дополнительных полостей, щелей и зазоров. Пламя, вовлекая продукты пиролиза древесины и при наличии

достаточного количество воздуха, имеет высокую температуру, что способствует интенсивному развитию горения. Усушка древесины вдоль волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях существенно различаются. Усушка вдоль волокон древесины обычно мала и ей пренебрегают, усушка в радиальном направлении колеблется в пределах 2-8,5%, а в тангенциальном – 2,2-14%. Поэтому при строительстве деревянных домов из бруса, круглых бревен над оконными и дверными блоками создаются технологические пустоты, которые заполняются теплоизоляционным материалом. Эти пустоты создают условия перехода пожара как изнутри помещения на фасад здания, так и наоборот.

Применяемые в различных конструкциях противопожарные рассечки не могут быть надежным препятствием распространению пламени, так как даже малейшая их деформация приводит к появлению трещин, отверстий и т.д. Поэтому более надежным способом ограничения распространения пожара в деревянном здании является создание массивных или заполненных теплоизоляцией объемов, например, сот или ячеек.

Для обеспечения пожарной безопасности индустриальное деревянное домостроение имеет неоспоримое преимущество перед индивидуальным. Именно промышленное производство обеспечивает максимальный учет условий работы древесины и устранения причин, способствующих проявлению ее отрицательных качеств. Одним из таких качеств является широкий диапазон колебаний свойств древесины в период строительства и эксплуатации зданий. Фактические характеристики древесины могут отличаться от расчетных. При этом, факторов, влияющих на свойства древесины, достаточно много, прежде всего это анизотропность, порода, сортность, пороки. Например, одна и та же порода деревьев, выращенных в разных климатических условиях, имеет разные свойства древесины. Считается, что древесина хвойных пород, обладающая высокой смолистой, более пожароопасная, чем лиственных. Поэтому, тщательный контроль качества при изготовлении деревянных конструкций возможен лишь

при индустриальном производстве. Применение сушильного оборудования, разнообразных деревообрабатывающих станков и механизмов позволяет обеспечить максимальную неизменяемость геометрических форм изделий при длительной эксплуатации и высокую точность изготовления соединительных элементов.

Отдельно следует отметить токсичность продуктов горения. При конструировании зданий возникает два основных аспекта. Первое - это применение материалов на основе древесины, в составе которых имеются полимерные смолы и второе - это режимы горения при недостатке кислорода. Не важно, какие именно продукты горения генерируются огнем, тем более их бинарное воздействие невозможно оценить, более существенным является проблемы их удаления. Методы дымоудаления, применяемые для зданий из не распространяющих горение материалов, для деревянных зданий могут быть непригодными, так возникающий приток кислорода воздуха интенсифицирует реакцию горения. Поэтому для большеобъемных зданий наиболее приемлемым вариантом может быть сочетание объемно-планировочных решений и инженерных систем на основе расчетов развития опасных факторов пожара.

Использование в зданиях и сооружениях деревянных конструкций или конструкций с материалами на основе древесины предполагает дополнительные правила эксплуатации этих зданий и содержания прилегающей территории. Данные правила, с учетом противопожарного устройства населенного пункта, необходимо включать в соответствующие разделы проектов.

Одним из преимуществ деревянного домостроения является ремонтпригодность после пожара. Даже при наличии значительных повреждений здания при горении, деревянное здание восстанавливается быстрее, чем железобетонное или здание из металлоконструкций. Оценка повреждений деревянных элементов здания не требует инструментальных исследований. Поэтому деревянная конструкция может быть восстановлена путем замены

элементов, подверженных горению. Основным требованием при восстановлении является улучшение технических характеристик элементов конструкции и их сочленений.

Современное здание немислимо без входящих в его состав сетей инженерно-технического обеспечения и систем обеспечения безопасности. Поэтому особенности конструктива деревянных зданий накладывают определенные технические требования к этим системам. Таким образом, техническое задание на проектирование инженерных систем зданий с деревянными конструкциями должно иметь особые требования для обеспечения пожарной безопасности.

Соответствие процессов проектирования новой серии, типа, вида деревянных зданий, утверждение функционального назначения, допускаемой области применения и комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта деревянного домостроения промышленного производства в населенных пунктах должен определяться на основании Технического свидетельства о пригодности новой продукции для применения в строительстве на территории Российской Федерации.

4 ОГНЕСТОЙКОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Способы стыковки деревянных конструктивных элементов, применяемых в строительстве, многообразны и зависят от способа изготовления, страны и, следовательно, культуры производства деревянных конструкций, назначения и задач. Деревянные элементы соединяются по длине — сращиваются, по ширине — сплачиваются, связываются под углом узлами и прикрепляются к опорам — анкеруются.

Клеевые соединения, наиболее прогрессивные и технологичные, являются основными соединениями элементов при заводском изготовлении деревянных конструкций. Соединения, не требующие специальных связей (упоры и врубки), применяются главным образом при построечном изготовлении деревянных конструкций. Металлические соединения являются универсальными и широко используются при обоих основных методах изготовления деревянных конструкций. Соединения с деревянными связями являются устарелыми типами соединений, требующими значительных затрат ручного труда. Они применяются редко и только при построечном изготовлении деревянных конструкций.

Нормативные требования в России распространяются на расчет соединений деревянных конструкций по прочности, при этом принимаются механические характеристики древесины при нормальной температуре 20°C, что соответствует общему расчёту конструктивной системы при пожаре в момент времени $t = 0$. Однако, например, в Европе, согласно EN 1995-1-2:2004[21] в расчете используется модель конструктивной системы, отражающая ожидаемое поведение конструкции при пожаре, при которой расчетная величина механического сопротивления в ситуации пожара принимается на момент времени t . [14]

Таким образом, несущие деревянные конструкции должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы сохранять несущую способность в течение расчетной продолжительности опасных воздействий при пожаре.

Ограждающие и несущие деревянные конструкции, включая соединения, должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы сохранять ограждающую (несущую) способность в течение всего времени воздействия при пожаре. Это обеспечивается следующим:

- целостностью конструкции;
- обеспечением теплопроводности;

- отсутствием теплового излучения.

Исходя из практики исследования пожаров деревянных зданий и сооружений следует отметить, что наиболее уязвимыми при пожаре становятся соединения деревянных элементов. Таким образом предел прочности деревянных конструкций при пожаре лимитируется пределом прочности соединений.

Потому при выборе конструктивной схемы деревянных соединений следует учитывать поведение выбранного способа стыковки при пожаре. Поведение стыковых соединений деревянных конструкций в настоящее время наименее исследовано, поэтому для надежной оценки могут приниматься только результаты экспериментальных испытаний.

Соединения деревянных конструкций с применением металлических изделий: болтов, штырей, гвоздей, винтов и хомутов наиболее подвержены разрушительным воздействиям пожара. Металлические элементы имеют небольшой предел огнестойкости, не более 15 минут, а при малых сечения время наступления их предела прочности ограничивается 5-7 минутами. Так, в виду высокой теплопроводности металлических элементов, происходит их вывал из массива древесины.

Полимерные нагели и штыри, применяемые в клеевых соединениях, при пожаре также ведут себя неустойчиво, так как клеевые составы, используемые при склеивании древесины, размягчаются при нагреве свыше 105°C. Поэтому, в ряде случаев, разрушение клеевых соединений может наступить в первые минуты пожара.

Особое влияние пожар оказывает на деревянные соединения, имеющие неплотности и отверстия. Конвективные потоки, возникающие при горении, могут проникать через щели и отверстия, вовлекая в горение древесину в месте соединения.

Соединения деревянных элементов малого сечения также не способствуют сохранению несущей способности конструкции при пожаре. При высокой

скорости обугливания, сечение элемента быстро сокращается, что приводит к разрушению.

Срок эксплуатации узловых соединений также оказывает влияние на огнестойкость деревянной конструкции, так как неплотности, образующиеся в них в результате деформации, возникающей от усушки и смятия древесины, при пожаре непременно приведет к горению и последующему разрушению стыкового соединения.

Повышение огнестойкости соединений деревянных элементов будет рассмотрено в следующей главе, однако следует изучить возможность конструкционного повышения огнестойкости.

Большим пределом огнестойкости будут обладать соединения деревянных элементов, основанные на следующих принципах:

- отсутствие проводников тепла;
- отсутствие материалов с низкой температурой плавления;
- ограничение сквозных щелей и отверстий;
- увеличение геометрических размеров деревянных элементов в местах их соединения.

Типы соединений

Размеры лесоматериалов (длина и сечение) ограничены, поэтому отдельно они могут быть применены только в виде стоек и балок невысокой несущей способности. Для создания большинства строительных конструкций деревянные элементы должны быть прочно и надежно соединены между собой. При помощи соединений ряд элементов соединяется по длине — сращивается, по ширине — сплачивается, связывается под углом узлами и прикрепляется к опорам — анкеруется.

Соединения являются наиболее ответственными деталями деревянных конструкций. При изготовлении многих соединений в элементах конструкций делают отверстия и врезки, ослабляющие их сечения и повышающие их

деформативность. Разрушение деревянных конструкций начинается в большинстве случаев в соединениях. Деформативностью соединений объясняются повышенные прогибы деревянных конструкций. Таким образом, от правильного решения, расчета и изготовления соединений зависят прочность и деформативность конструкции в целом.

Анизотропия строения, малая прочность древесины при скалывании, растяжении поперек волокон и смятии являются причиной большой сложности и многообразия соединений конструкций из дерева.

Достаточно просто и надежно решаются конструкции соединений сжатых деревянных элементов, в которых усилия передаются непосредственно от элемента, к элементу и не требуется специальных рабочих связей. Более сложно решаются соединения изгибаемых элементов, в которых для передачи усилий требуются рабочие связи. Сложнее всего решаются соединения растянутых элементов. В них имеется опасность хрупкого разрушения древесины по ослабленным сечениям, а также в результате скалывания и растяжения поперек волокон. Применение в соединениях растянутых элементов податливо работающих связей уменьшает опасность их хрупкого разрушения. Сложность соединения растянутых деревянных элементов, в ряде конструкций, приводит к их замене металлическими.

По характеру работы все основные соединения деревянных конструкций могут быть разделены на следующие группы:

а) соединения без специальных связей, требующих расчета, — упоры и врубки;

б) соединения со связями, работающими на сжатие, — шпонками и колодками;

в) соединения со связями, работающими на изгиб, — нагелями-болтами, штырями, гвоздями, винтами, деревянными пластинками и штырями;

г) соединения со связями, работающими на растяжение, — болтами, гвоздями, винтами и хомутами;

д) соединения со связями, работающими на сдвиг, — клеевыми швами.

В связи с тем, что одни и те же связи входят в разные группы, удобно изучать соединения деревянных конструкций в следующем порядке: соединения без специальных связей, с деревянными связями, с металлическими связями, с клеевыми связями.

Все соединения деревянных конструкций являются податливыми, за исключением клеевых. Деформации в них образуются в результате неплотностей, возникающих при изготовлении, от усушки и смятия древесины, особенно поперек волокон и изгиба связей. Величина этих деформаций при длительном действии расчетных нагрузок в соединениях, где древесина работает поперек волокон, принимается равной 3 мм, а во всех других случаях — 1,5—2 мм.

В большинстве соединений деревянных конструкций, кроме клеевых, в результате действия сжимающих усилий или начального обжима, например, при постановке болтов, между соединяемыми элементами возникают силы трения, которые уменьшают усилия в связях. Однако эти силы в результате возможной знакопеременности усилий, усушки древесины и ослабления начальных натяжений связей могут снизиться до нуля и поэтому расчетом не учитываются. Они учитываются только при кратковременном действии сжатия с коэффициентами трения пласти по пласти 0,2, торца по пласти 0,3 и когда они вызывают дополнительные напряжения с коэффициентом трения 0,6.

Расчет соединений деревянных конструкций по прочности производят на основе методики, изложенной в данной главе.

Соединения без специальных связей

Соединения элементов, в которых действуют незначительные усилия или усилия передаются непосредственно от одного элемента к другому, не требуют

специальных связей, подлежащих расчету. К таким соединениям относятся конструктивные врубки, лобовые упоры и лобовые врубки.

Отсутствие теплопроводящих элементов, зазоров и разрушаемых элементов при нагреве переопределяет наилучшие показатели устойчивости при пожаре деревянных конструкций с данным видом соединений.

Конструктивные врубки (см. рис.15) являются соединениями, в которых возникают усилия намного меньше их несущей способности, и они не нуждаются в расчете. В деревянных конструкциях наибольшее применение находят конструктивные соединения в четверть, в шпунт, в полдерева и косой прируб.

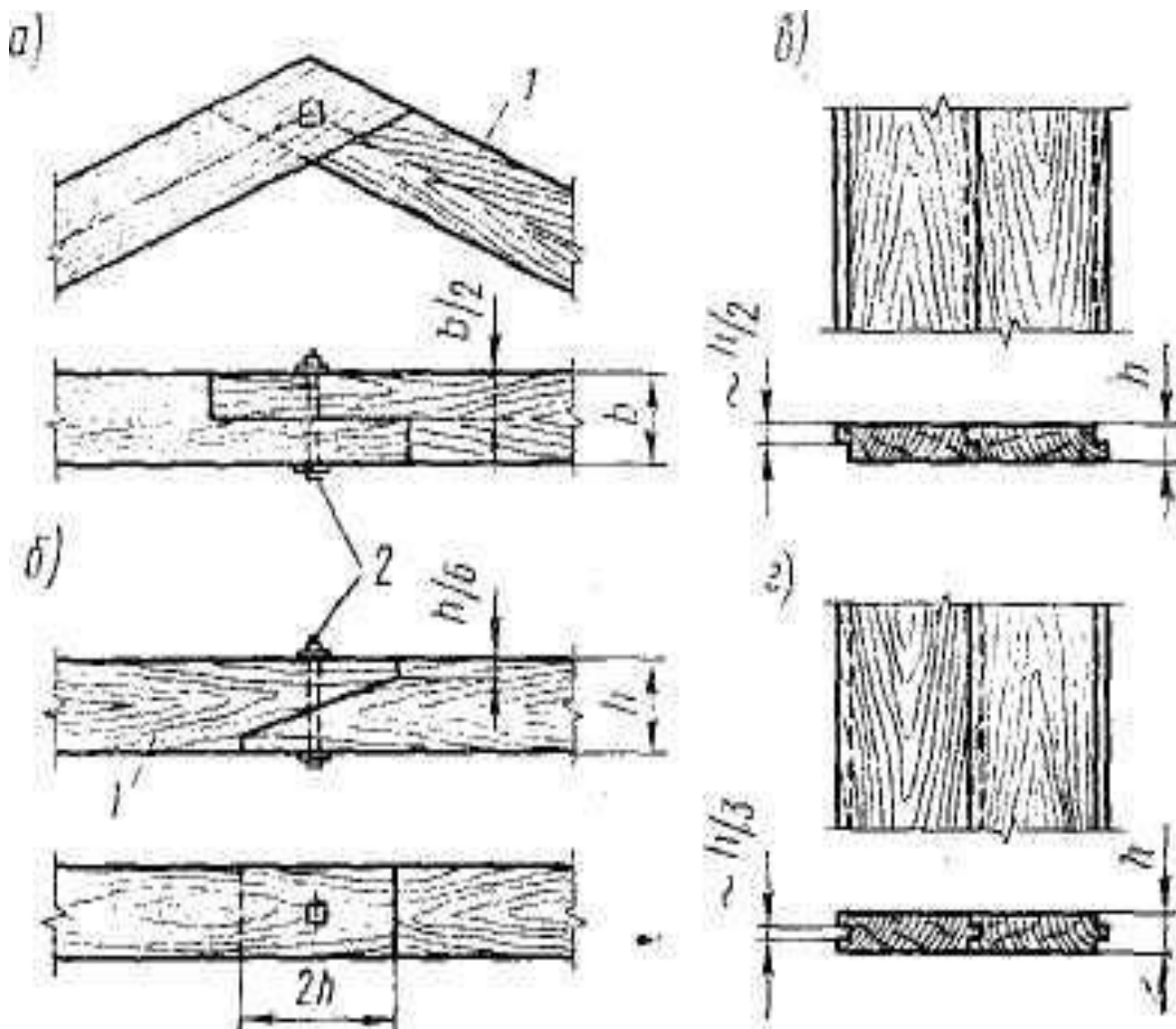


Рисунок 15 - Конструктивные врубки:

а - врубка в полдерева; б - косой прируб; в - соединения в четверть; г - соединения в шпунт;

1 - соединяемые элементы; 2 - стяжные болты

Соединение в четверть представляет собой сплачивание досок кромками по ширине, для чего в них вырезаются односторонние пазы глубиной, несколько большей половины толщины, в которые входят образовавшиеся выступы кромок соседних досок. Обшивки стен из досок, соединенных в четверть, препятствуют продуванию стен и проникновению атмосферных осадков. Сосредоточенные нагрузки в таких обшивках распределяются на две соседние доски.

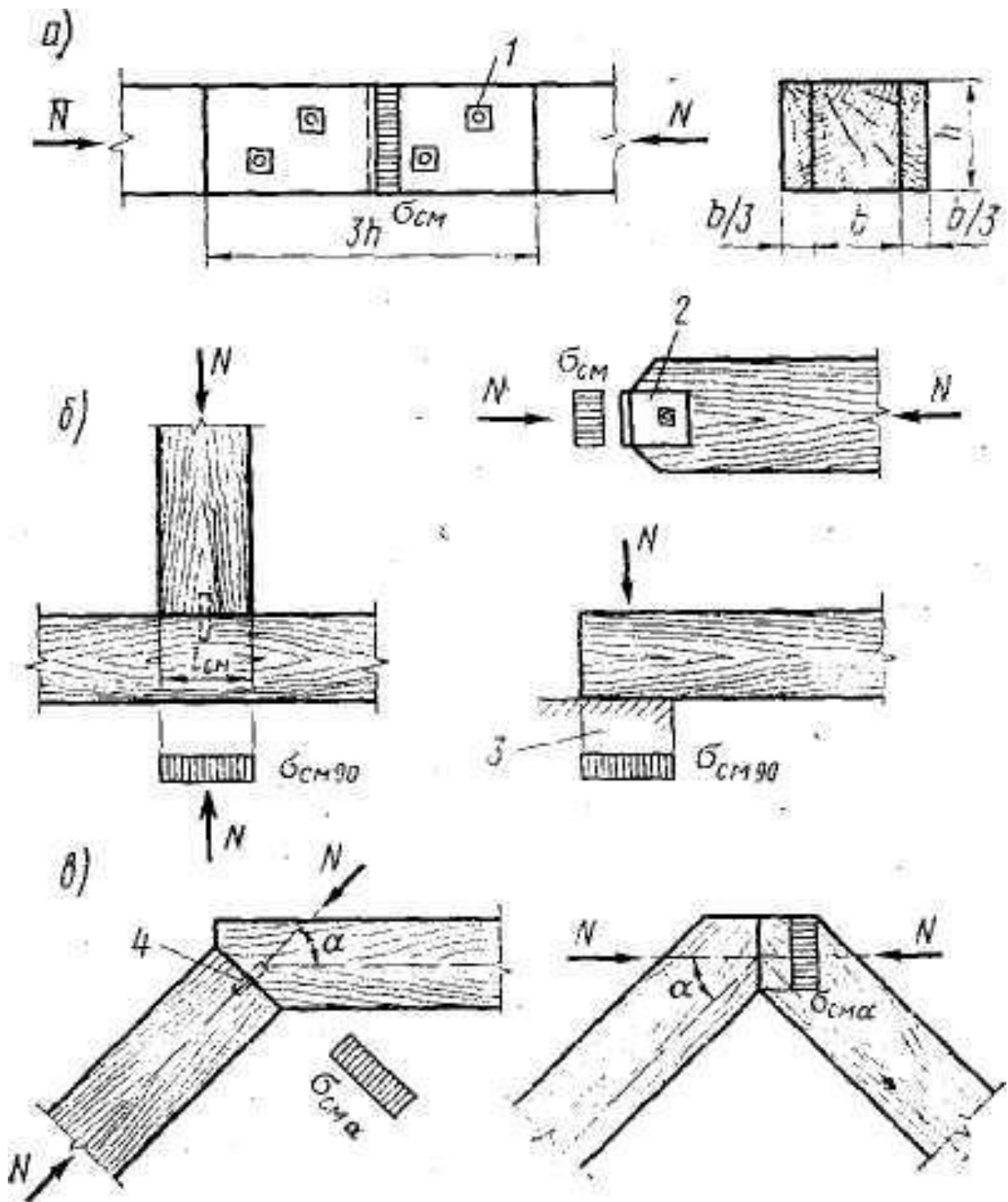


Рисунок 16 - Лобовые упоры:

а - продольные; б - поперечные; в - наклонные;

1 - стяжной болт; 2 - узловое крепление; 3- опора; 4-штырь

Соединение в шпунт представляет собой сплачивание досок или брусьев кромками, в одной из которых вырезаны двусторонние пазы, в другой - один средний паз (шпунт), равный примерно $\frac{1}{3}$ толщины, в который входит образовавшийся выступ (гребень) соседней доски. Настилы из досок, соединенные в шпунт, препятствуют просыпанию засыпок, и сосредоточенные нагрузки на них распределяются на ряд соседних досок.

Врубка в полдерева представляет собой соединение концов брусьев или бревен с врезками до половины толщины под углом в одной плоскости, стянутых конструктивным болтом. Так соединяются, например, концы стропильных ног в коньке крыш.

Косой прируб представляет собой продольное сращивание брусьев или бревен концами, в которых сделаны односторонние наклонные врезки длиной, равной удвоенной высоте сечения, с торцами, равными $0,15$ высоты сечения. Косые прирубы стягиваются конструктивными болтами и применяются для соединения прогонов и балок по длине.

Лобовые упоры(см. рис.16) являются наиболее простыми и надежными соединениями, применяемыми в большинстве видов деревянных конструкций для крепления сжатых стержней. Они работают и рассчитываются на смятие, возникающее в них от действия сжимающих усилий. На растяжение они работать не могут. Лобовые упоры бывают продольными, поперечными и наклонными.

Продольный лобовой упор- это соединение обрезанного под прямым углом конца сжатого стержня с опорой, диафрагмой узла или торца другого такого же стержня в сжатом стыке. В стыке упор перекрывается конструктивно двусторонними накладками толщиной не менее $\frac{1}{3}$ толщины стержней и длиной не менее трех высот сечений на болтах. В продольном лобовом упоре древесина работает на смятие вдоль волокон и имеет наиболее высокое расчетное сопротивление. В большинстве случаев напряжения смятия достигают

значительной величины и требуют проверки только в упорах, где на смятие работает только часть площади торца.

Поперечный лобовой упор- это соединение двух стержней под прямым углом, когда торец сжатого стержня упирается в пластъ другого и закрепляется конструктивными накладками на болтах. Так, например, соединяются стойки с верхними и нижними элементами каркаса. В этом соединении древесина торца работает на смятие вдоль волокон, а древесина пласти - поперек волокон. Соединение рассчитывается только по меньшей прочности древесины при местном смятии поперек волокон.

Наклонный лобовой упор представляет собой соединение двух сжатых стержней под углом меньше прямого. При этом конец одного из них образуется под прямым углом. Так, например, соединяются подкосы с ригелями в подкосных конструкциях. В этом соединении площадь, где смятие происходит под углом к волокнам древесины, имеет меньшее сопротивление смятию и должна быть проверена по прочности при общем смятии под углом. Формула (7) может быть упрощена путем подстановки значений расчетных сопротивлений смятию вдоль и поперек волокон:

$$R_{смя} = \frac{13}{1 + 6,22 \cdot \sin^3 \alpha} \quad (7)$$

Лобовая врубка с одним зубом является простым в изготовлении соединением двух стержней углом. Она применяется главным образом для соединения стержней малопролетных дерм и подкосных систем в узлах при их построечном изготовлении, причем один из врубаемых, должен быть обязательно сжат. Примером лобовой врубки является опорный узел треугольной брусчатой малопролетной фермы (См. рис.17).

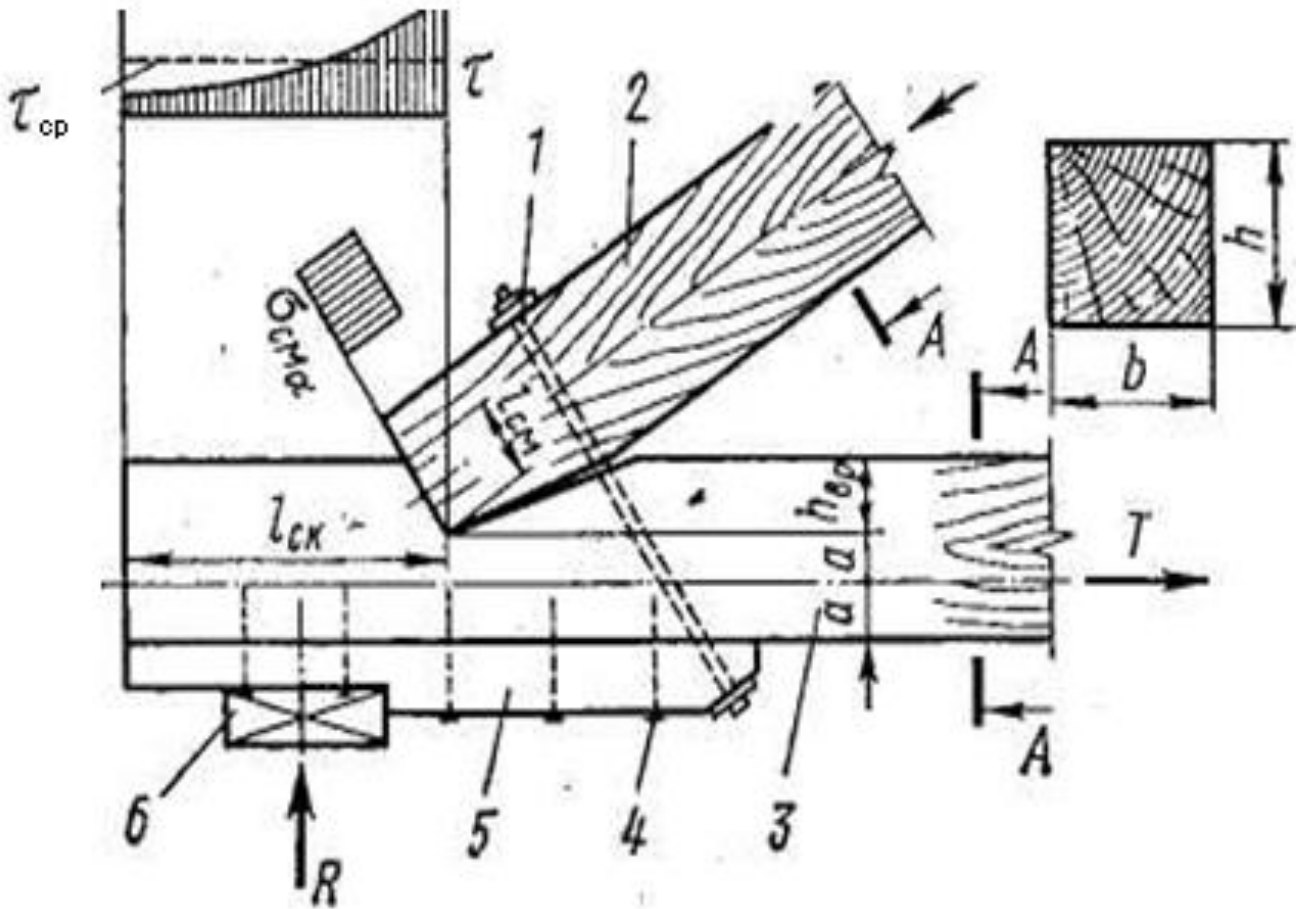


Рисунок 17 - Лобовая врубка:

- 1 — аварийный болт; 2 — врубаемый элемент; 3 — опорный элемент; 4 — гвозди;
5 — подбалка; 6 — опорная подкладка

Врубаемый стержень верхнего пояса фермы частью обрезанного под прямым углом и срезанного снизу конца «зубом» вводится во врезку в стержне нижнего пояса и упирается в ее рабочую поверхность. Узкий клиновидный зазор исключает нежелательное сжатие нерабочих поверхностей врубки. Глубина врубки $h_{вр}$ должна быть не более $1/3$, а расстояние от ее вершины до конца нижнего пояса $l_{ск}$ — не менее $1,5$ высоты его сечения h для получения достаточных площадей растяжения и скалывания. Врубка должна быть центрирована по осям опоры верхнего пояса и ослабленного врубкой сечения нижнего пояса, для того чтобы в этом сечении не возникло, кроме растяжения, еще и изгиба от эксцентриситета растягивающего усилия. Врубка дополнительно стягивается

наклонным болтом, перпендикулярным верхнему поясу и называется аварийным. Он препятствует расхождению стержней в процессе монтажа фермы в случае возникновения растяжения в верхнем поясе. При разрушении врубки от скалывания аварийный болт включается в работу и предотвращает опасность внезапного обрушения фермы. Опорная подбалка, прибиваемая гвоздями, предохраняет нижний пояс от местного смятия на опоре и необходимости устройства в нем ослабляющей его врезки для шайбы аварийного болта.

Лобовая врубка работает и рассчитывается на смятие от действия сжимающего усилия во врубаемом стержне N и скалывание от действия горизонтальной проекции этого усилия T , равного растягивающему усилию в нижнем поясе фермы.

Смятие древесины.

От действия сжимающего усилия N по площади упора торца сжатого стержня в рабочую поверхность врезки растянутого возникают равномерные напряжения смятия σ . Площадь смятия F_0 определяют в зависимости от глубины врубки $h_{вр}$, угла наклона сжатого стержня α и ширины врубки b , которая в брусках равна ширине сечения, а в бревнах диаметром d_0 находят из выражения

$$b = 2\sqrt{h_{вр}(\alpha - h_{вр})} \quad (8)$$

Соответственно площадь смятия равна: во врубках брусков - $F = \frac{bh_{вр}}{\cos\alpha}$; во врубках бревен - $F = \frac{0,71bh_{вр}}{\cos\alpha}$.

Расчет производят по прочности рабочей площади врезки при местном смятии под углом к волокнам растянутого стержня α . Расчетное сопротивление местному смятию под углом к волокнам, ввиду малой длины площади смятия, и значительного поддерживающего действия соседних участков древесины, определяют по формуле (9) с учетом повышенного коэффициента условий работы $m_{см2} = 1,65$:

$$R_{см90} = 1,65 \cdot 1,8 = 3 \text{ МПа} \quad \text{и} \quad R_{см\alpha} = \frac{13}{1 + 3,22 \cdot \sin^3 \alpha} \quad (9)$$

По этой же формуле, переписанной относительно сжимающего усилия N , определяют несущую способность врубки по смятию древесины.

Скалывание древесины. От действия скалывающих усилий T вдоль волокон древесины по площади скалывания F , равной произведению ширины врубки b на длину скалывания l возникают скалывающие напряжения τ . Длина площади скалывания $l_{ск}$ равна расстоянию от нижней точки врубки до конца растянутого стержня, но учитывается не более длины, равной 10 глубинам врубки $hвр$.

Напряжения скалывания τ распределяются по длине площади скалывания особенно неравномерно, так как силы скалывания действуют с одной стороны от площади скалывания и достигают максимума близ врубки. Напряжения же отрыва здесь несколько снижаются в результате прижима, создаваемого вертикальной составляющей усилия сжатия.

Расчет производят по прочности при скалывании по средним значениям скалывающих напряжений. Расчетное среднее сопротивление скалыванию $R_{ск}^{cp}$ определяют по формуле, где принимается коэффициент $\beta = 2,25$, а плечо пары сил скалывания $e = 0,5h$. При учете длины площади скалывания, равной не более двойной высоты сечения растянутого стержня, разрешается принимать расчетное среднее сопротивление скалыванию, равным $R_{ск}^{cp} = 1,2 \text{ МПа}$.

Лобовая врубка с двумя зубьями отличается тем, что сжатый стержень врубается в другой двумя зубьями, в результате чего во врубке образуется две площади смятия и скалывания. Эта врубка является более сложной, трудоемкой и требует повышенной точности изготовления для обеспечения совместной работы всех рабочих площадей. Такая врубка, в некоторых случаях, применяется для соединения стержней под углом 45° и более.

Соединения с деревянными связями являются трудоемкими и устаревшими соединениями построечного изготовления. Связями здесь служат небольшие

деревянные вкладыши. Они плотно вставляются в соответствующие отверстия в соединяемых элементах - бревнах или брусках - и обеспечивают их совместную работу на изгиб, воспринимая сдвигающие усилия. Соединения бывают на шпонках, пластинках и штырях.

Соединения на шпонках выполняют при помощи брусков - шпонок или колодок, которые работают на смятие и скалывание и создают поперечный распор элементов, воспринимаемый болтами. Соединения на пластинках выполняют при помощи дубовых пластинок (пластинчатых нагелей), которые работают на изгиб и смятие древесины и не создают поперечного распора. Соединения на штырях выполняют при помощи дубовых штырей (дубовых нагелей), которые тоже работают на изгиб и смятие без поперечного распора.

Эти соединения применяются в некоторых временных деревянных конструкциях и гидротехническом строительстве.

Соединения со стальными связями

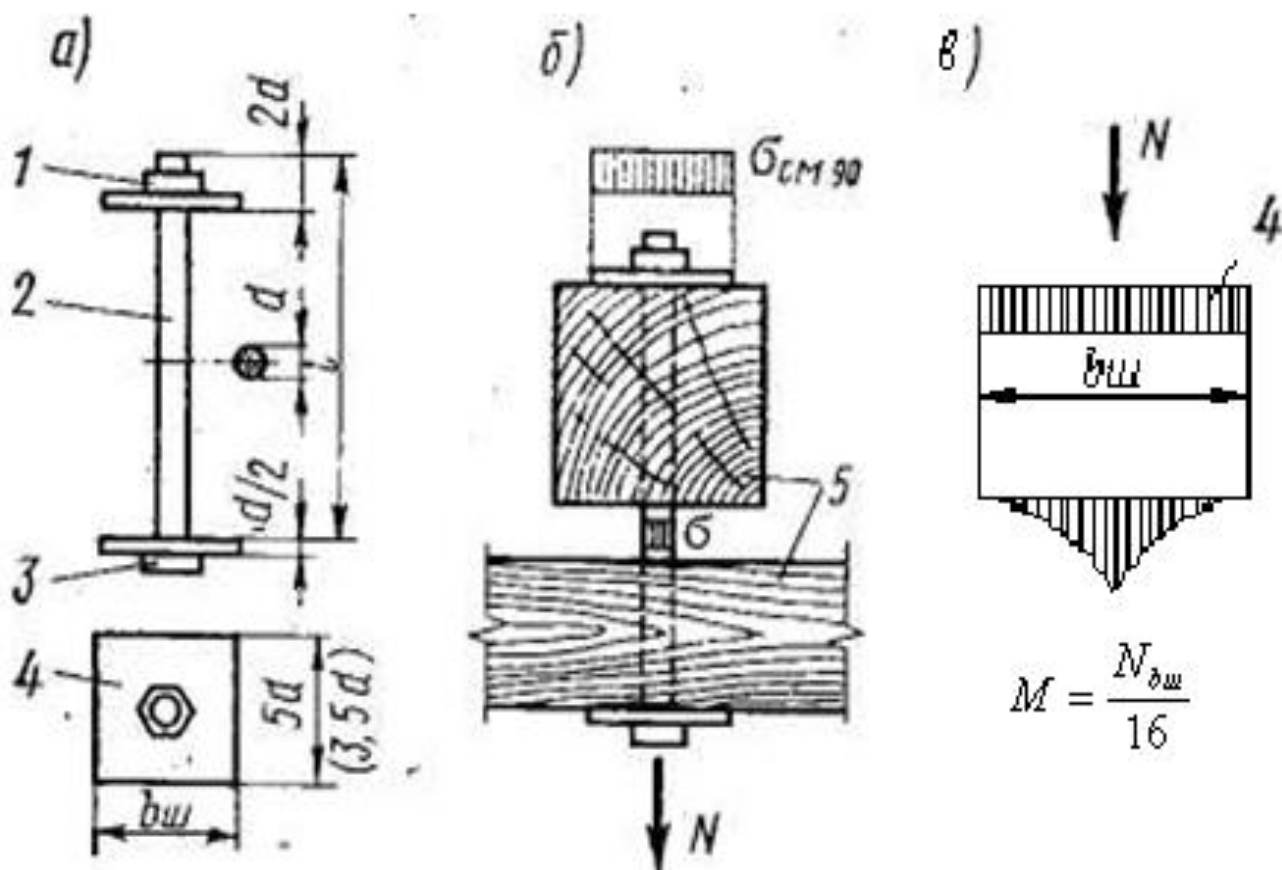


Рисунок 18 - Растянутые болты:

а - общий вид; б - схема работы болта и древесины; в - схема работы шайбы;
1 - гайка; 2 - стержень; 3 - головка; 4 - шайба; 5 - соединяемые элементы

Соединения, в которых усилия отсутствуют или действуют растягивающие, сжимающие или сдвигающие силы, успешно решаются при помощи стальных связей. В число этих связей входят болты, стержни, гвозди, винты, когтевые шайбы, хомуты и некоторые другие связи. Стальные связи в зависимости от характера их работы могут входить в состав стяжных, растянутых или изгибаемых - нагельных соединений. Они являются наиболее универсальными и применяются как при заводском, так и построечном изготовлении деревянных конструкций. Наиболее распространенными стальными связями являются болты и гвозди.

Болтовые соединения.

Болты (см. рис.18) представляют собой стандартизованные изделия из строительной стали марки С38/23. Болты, применяемые в большинстве деревянных конструкций, называются черными и изготавливаются без точной обработки. Они отличаются значительной длиной, соответствующей крупным сечениям деревянных элементов, и снабжаются большими квадратными шайбами, необходимыми для распределения усилия в болте на достаточную площадь древесины. Наибольшее распространение получили болты диаметром 12, 16 и 20 мм.

Для постановки болтов в соединяемых элементах просверливают отверстия такого же диаметра, как и болт. Для надежного совпадения отверстий при сборке конструкций сверлить отверстия следует одним проходом сверла через соединяемые элементы или в отдельных элементах по шаблонам. Болтовые соединения бывают со стяжными, растянутыми и изгибаемыми болтами.

Соединения со стяжными болтами служат для плотного соединения отдельных элементов при их поперечном сплачивании и в некоторых узлах конструкций. В них могут возникать лишь незначительные усилия, и расчет их не

требуется. Сечения стяжных болтов устанавливаются по конструктивным соображениям. Диаметр болтов не должен быть меньше 12 мм и меньше 1/20 общей толщины соединяемых элементов.

Шайбы стяжных болтов должны иметь ширину не менее 3,5 и толщину не менее 0,25 размера их диаметра. В первые годы эксплуатации стяжные болты нередко ослабевают и нуждаются в подтяжке.

Соединения с растянутыми болтами применяются при анкерном креплении деревянных конструкций к опорам, при подвеске к конструкциям перекрытий и оборудования и в узловых соединениях. Они воспринимают действующие в соединениях растягивающие усилия N .

Болт работает и рассчитывается на растяжение по площади сечения ослабленной нарезкой F . Расчетное сопротивление стали принимается уменьшенным на 20% с учетом концентрации растягивающих напряжений, α в зоне нарезки. Расчет производят по формуле

$$\sigma = N/F \leq 0,8R \quad (10)$$

По этой же формуле, переписанной относительно требуемой площади сечения болта F_{mp} , с помощью табличных данных можно подобрать сечение болта.

Древесина под шайбами болта работает и рассчитывается на местное смятие. Расчетное сопротивление смятию под шайбами при углах смятия от 90 до 60° принимается с учетом малой площади смятия и значительного поддерживающего действия окружающих участков древесины, с повышенным коэффициентом условий работы $m_{смз} = 2,2$ и составляет $R_{ск90} = 18 \cdot 2,2 = 4 \text{ МПа}$. Расчетное сопротивление смятию под шайбами под углом α к волокнам определяют по формуле (11), которая после подстановки числовых значений расчетных сопротивлений имеет вид

$$R_{см\alpha} = \frac{13}{1 - 2,25 \cdot \sin^3 \alpha} \quad (11)$$

Расчет на смятие под шайбами производят по формуле (11).

Шайбы болтов работают и рассчитываются на изгиб от реактивного давления сминаемой древесины как квадратные пластинки шириной b , опертые в центре на гайку болта. Наибольший изгибающий момент M в среднем сечении шайбы, ослабленном отверстием диаметром d , и требуемую толщину шайбы δ_{mp} можно приближенно определить из выражений

$$M = Nb/16; \quad \delta_{mp} = \sqrt{\frac{6M}{(b-d)R}}. \quad (12)$$

Аналогично рассчитывают растянутые стержни сквозных конструкций круглого сечения с шайбами и гайками на концах. Их максимальная гибкость не должна превышать 400. Если в соединении применен ряд болтов, расчетное сопротивление снижается на 0,85, учитывая возможную неравномерность его распределения между болтами.

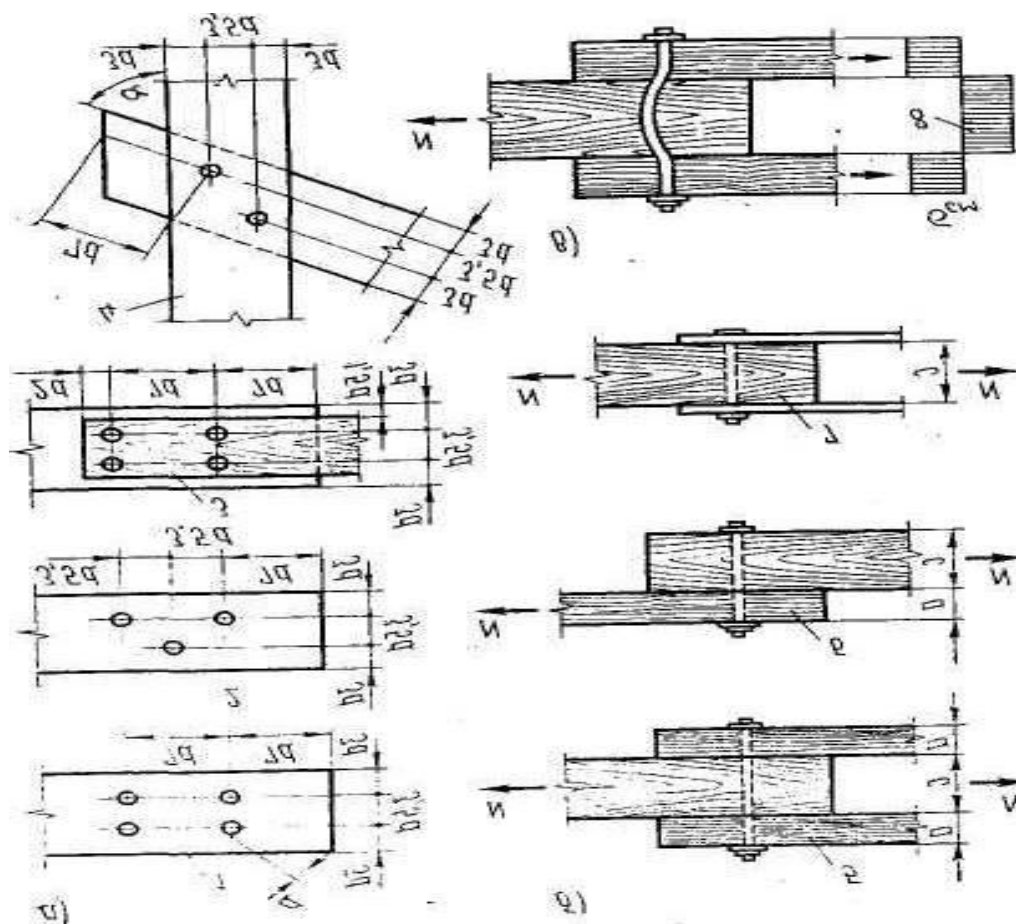


Рисунок 19 - Изгибаемые болты:

а - схемы расстановки; б - расчетные схемы; в- схема работы;

1 - прямая расстановка; 2- шахматная; 3 - в стальных накладках; 4- в соединениях под углом; 5 - симметричная двухсрезная схема; 6 - несимметричная односрезная; 7 - двухсрезная со стальными накладками; 8 - условные эпюры напряжений смятия

Соединения с изгибаемыми болтами (см. рис.19) относятся к классу нагельных, в которых связи, в данном случае болты, работают главным образом на изгиб без распора. Эти соединения широко применяются в стыках и узлах деревянных конструкций, препятствуя взаимным сдвигам соединяемых элементов, причем усилия в них могут быть знакопеременными. Шайбы этих болтов не воспринимают расчетных усилий и имеют те же размеры, что и стяжные болты. От продольных усилий, действующих в таком соединении, по площади контакта болта с отверстием в древесине соединяемых элементов возникают неравномерные по периметру и длине напряжения смятия, а также скалывания и растяжения поперек волокон между отверстиями. В результате реактивного давления древесины в болте возникают усилия изгиба и среза.

Расстановку болтов в соединении производят по правилам, исключаящим опасность преждевременного разрушения элементов древесины от скалывания и растяжения поперек волокон. Расстояние между осями болтов вдоль волокон и до торцов элементов должно быть не меньше $7d$, а поперек волокон между осями — $3,5d$ и до кромок — $3d$.

Болтовые соединения могут быть симметричными, когда продольные силы действуют вдоль одной оси, относительно которой симметрично расположены элементы, и несимметричными, когда оси элементов не совпадают, и симметрия соединения отсутствует. Соединяемые элементы могут располагаться по одной оси вдоль волокон, или под углом друг к другу.

Срезами в болтовых соединениях называются пересечения болтов с плоскостями сдвига между элементами, от числа которых прямо зависит несущая

способность соединения. Однако напряжения среза в болтах незначительны и не определяют их несущей способности.

Например, наиболее распространенный болтовой стык растянутых стержней с двусторонними деревянными накладками является симметричным двухсрезным соединением, а стык элементов, расположенных в разных плоскостях, без накладок, - несимметричным односрезным соединением.

Расчет болтового соединения производят по несущей способности в одном срезе болта по изгибу и древесины соединяемых элементов по смятию. Несущая способность болтовых соединений определена теоретически, причем болт, в системе уравнений, считался балкой, лежащей на упругом основании - древесине соединяемых элементов.

Несущая способность одного среза болта (МН) зависит от размеров (м) его диаметра d , толщины среднего элемента симметричных и более толстого или равного элемента несимметричных соединений s , толщины крайнего элемента симметричных и более тонкого элемента несимметричных соединений a и угла наклона волокон соединяемых элементов α и определяется по следующим формулам:

по изгибу болта:

$$T_{\text{и}} = (18d^2 + 0,2a^2)\sqrt{\kappa_{\alpha}}, \text{ но не более } 25d^2\sqrt{\kappa_{\alpha}}; \quad (13)$$

по смятию среднего элемента:

$$T_c = 5cd\kappa_{\alpha}; \quad (14)$$

по смятию крайнего и тонкого элемента:

$$T_a = 5ad\kappa_{\alpha}; \quad (15)$$

по смятию более толстого элемента:

$$T_c = 3,5cd\kappa_{\alpha}. \quad (16)$$

Коэффициенты κ_{α} учитывают меньшую несущую способность болтовых соединений элементов под углом в результате большей податливости древесины при смятии. Они зависят от размеров угла α , диаметра болта d и принимаются по

табл.4 для основных размеров диаметров, а для промежуточных - по интерполяции.

Таблица4

| Угол α ,град | Коэффициенты κ_α при диаметре d | | | |
|---------------------|---|------|------|------|
| | 12 | 16 | 20 | 25 |
| 30 | 0,95 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| 60 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,60 |
| 90 | 0,70 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |

Расчетная несущая способность болта в одном срезе Тявляется наименьшей из величин, определенных по этим формулам. Несущая способность болтового соединения прямо пропорциональна количеству болтовn, количеству срезовпри несущей способности одного среза болта. Количество болтов в соединении, где действует усилиеN,определяют по формуле

$$n \geq N / (T_{\min} n_{cp}) . (17)$$

В симметричных стыках это количество должно быть удвоено.

Болтовые соединения со стальными накладкамиприменяются в узлах конструкций. Накладки обычно делаются двусторонними из листовой стали. Расстояние от осей болтов до краев накладок должно быть не менее двух диаметров болтов вдоль и полутора - поперек усилия. Эти соединения на изгибаемых болтах являются симметричными и двусрезными. Несущую способность одного среза болта по смятию древесины определяют по формуле (18), а по изгибу болта, учитывая его частичное защемление в накладках- по формуле

$$T_{н} = 25d^2 \sqrt{\kappa_\alpha} . (18)$$

Соединения с изгибаемыми стальными стержнямивыполняются с применением арматурной стали класса А-I со снятыми фасками. Они тоже относятся к классу нагельных с цилиндрическими нагельями. Эти соединения

работают и рассчитываются так же, как соединения с изгибаемыми болтами. Расставляются они по тем же правилам, что и болты. В болтовых соединениях, с целью снижения их стоимости, может быть заменено стержнями до 75% болтов. Короткие стержни в соединениях со стальными накладками вставляются в несквозные отверстия в древесине. Они работают и рассчитываются как односрезные, несимметричные изгибаемые соединения и называются глухими нагелями.

Подбор сечений болтов и стержней производят из условия, чтобы сумма допускаемых расстояний между продольными осями и до кромок элемента, зависящих от их диаметра, не превышала высоты сечения элемента. Так, например, диаметр болтов d при расстановке в два продольных ряда в элементе высотой сечения h должен быть не более $3d + 3,5d + 3d \leq h, d \leq h/9,5$.

Общим недостатком болтовых соединений является их прогрев при пожаре. Однако предел огнестойкости деревянной конструкции лимитируется не пределом прочности стали, а площадью пиролиза древесины в месте соприкосновения с болтом и шайбой. Не менее проблемным остается эксплуатация соединений внешних деревянных конструкций. Под воздействие атмосферных осадков, а также образования влаги в «точке росы», с течением времени, соединения изменяют свои прочностные характеристики, и они становятся значительно ниже проектных. Поэтому болтовые соединения деревянных конструкций являются наиболее проблемными с точки зрения пожарной безопасности. Иногда болтовые деревянные соединения укрывают накладками, однако расчетные значения влияния накладок при пожаре не приводятся.

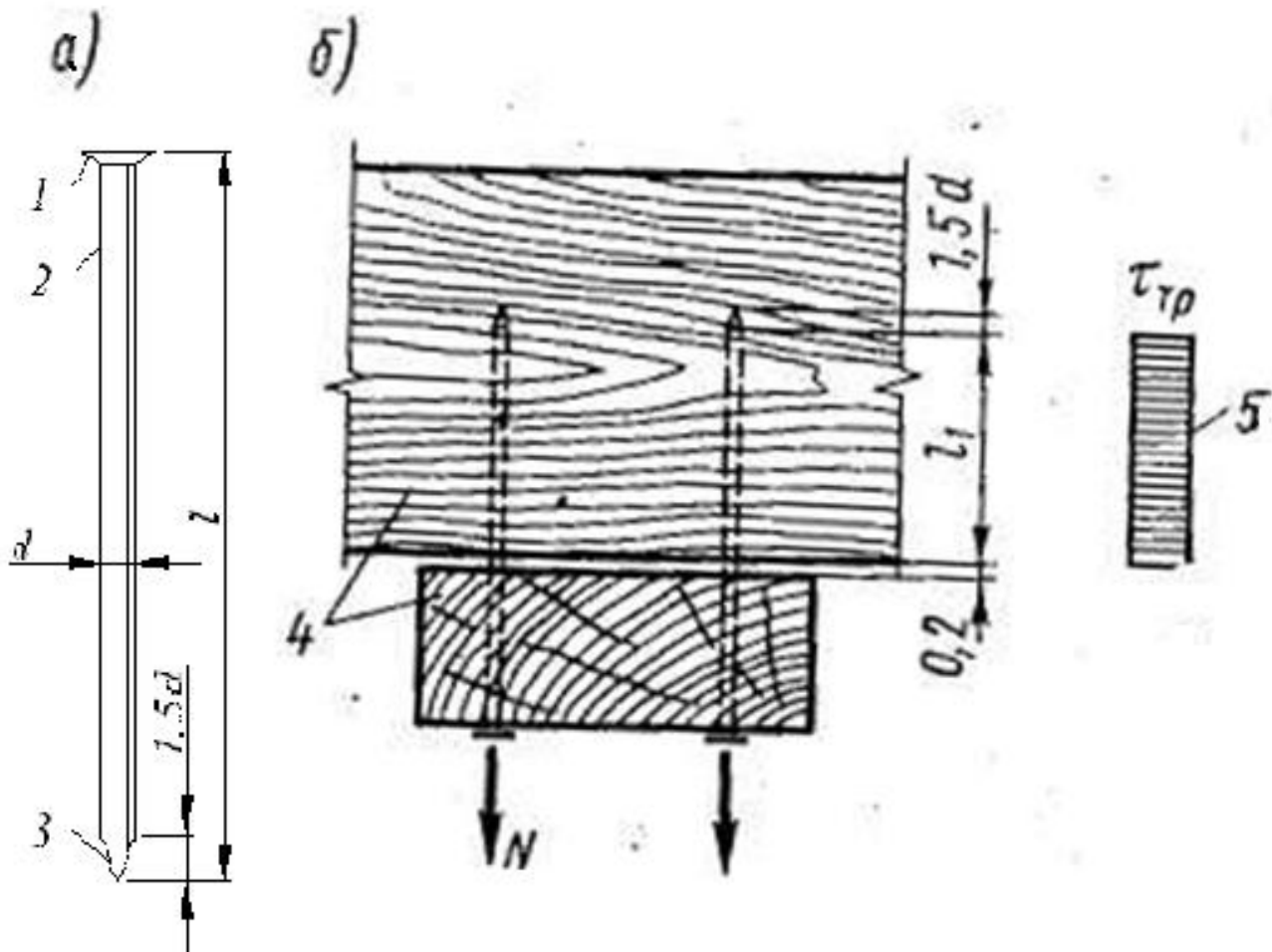


Рисунок 20 - Выдергиваемые гвозди:

а - общий вид; б - схема работы;

1 - шляпка; 2 - стержень; 3 - острие; 4 - соединяемые элементы; 5 - эпюра напряжений трения

Гвоздевые соединения.

Гвозди (см. рис.20) изготавливают из холодноотянутой проволоки в соответствии с ГОСТ 4028—63 [30]. Острие гвоздя имеет четырехгранную форму и длину, равную полутора диаметрам. Круглая шляпка имеет диаметр, равный двум диаметрам гвоздя. Наибольшее применение в деревянных конструкциях находят гвозди диаметром 3, 4, 5 и 6 мм и длиной соответственно 80, 100, 150 и 200 мм. Гвозди забивают в цельную древесину ударами ручного или пневматического молотка. Гвоздевые соединения являются простыми и

общедоступными, но трудоемкими и применяются главным образом при построечном изготовлении дощатых деревянных конструкций.

Гвоздь при забивке частично разрывает, а частично раздвигает волокна древесины, образуя в ней отверстие с уплотненными стенками. Благодаря этому он прочно зажимается в древесине и хорошо сопротивляется выдергиванию, однако по этой же причине в ней возникают дополнительные усилия растяжения поперек волокон. Кроме того, малая изгибная жесткость гвоздей приводит к повышенной ползучести гвоздевых соединений. Расхождению соединений препятствуют стяжные болты.

Правила расстановки гвоздей в соединениях исключают опасность преждевременного скалывания и раскалывания соединяемых элементов, которая повышается по мере уменьшения их толщины.

Поэтому диаметр гвоздей должен быть не более $\frac{1}{4}$ толщины элементов.

Расстояния между гвоздями диаметром d вдоль волокон соединяемых элементов должны быть не менее: от торцов— $15d$, между осями в элементах толщиной, равной и большей $10d$ — $15d$, между осями в элементах толщиной, равной $4d$ — $25d$, а в элементах промежуточной толщины принимают по интерполяции.

Расстояния между гвоздями поперек волокон и до кромок элементов должны быть при прямой расстановке не менее $4d$, а при расстановках шахматным и косыми рядами — не менее $3d$.

Соединения с конструктивными гвоздями применяются для крепления дощатых обшивок и настилов. Гвозди в них не несут существенных усилий и не рассчитываются.

Соединения с выдергиваемыми гвоздями (см. рис.20) относятся к классу соединений с растянутыми связями. Они применяются для крепления досок подшивок потолков, щитов перекрытий и опалубки. От действия нагрузок в этих соединениях возникают растягивающие усилия N , стремящиеся выдернуть гвозди

из древесины элемента, к которому прибиты доски. Этому усилию сопротивляются силы трения между поверхностью гвоздей и окружающей древесиной.

Расчетное сопротивление выдергиванию гвоздя, забитого в сухую древесину поперек волокон, составляет $R_{e,z} = 0,3 \text{ МПа}$, а в сырую, учитывая опасность появления трещин усушки в зоне гвоздевого отверстия после высыхания древесины элементов $R_{e,z} = 0,1 \text{ МПа}$. Несущую способность гвоздя диаметром d на выдергивание T_g определяют по формуле (19), как произведение расчетного сопротивления на площадь поверхности трения. При этом рабочую длину гвоздя l_1 находят по его общей длине, из которой исключается толщина прибиваемых досок, а также длина острия гвоздя, равная $1,5d$ и возможная щель между элементами шириной $0,002 \text{ м}$, не участвующие в работе на трение. Формула имеет вид

$$T_g = R_{e,z} \pi d l_1 \quad (19)$$

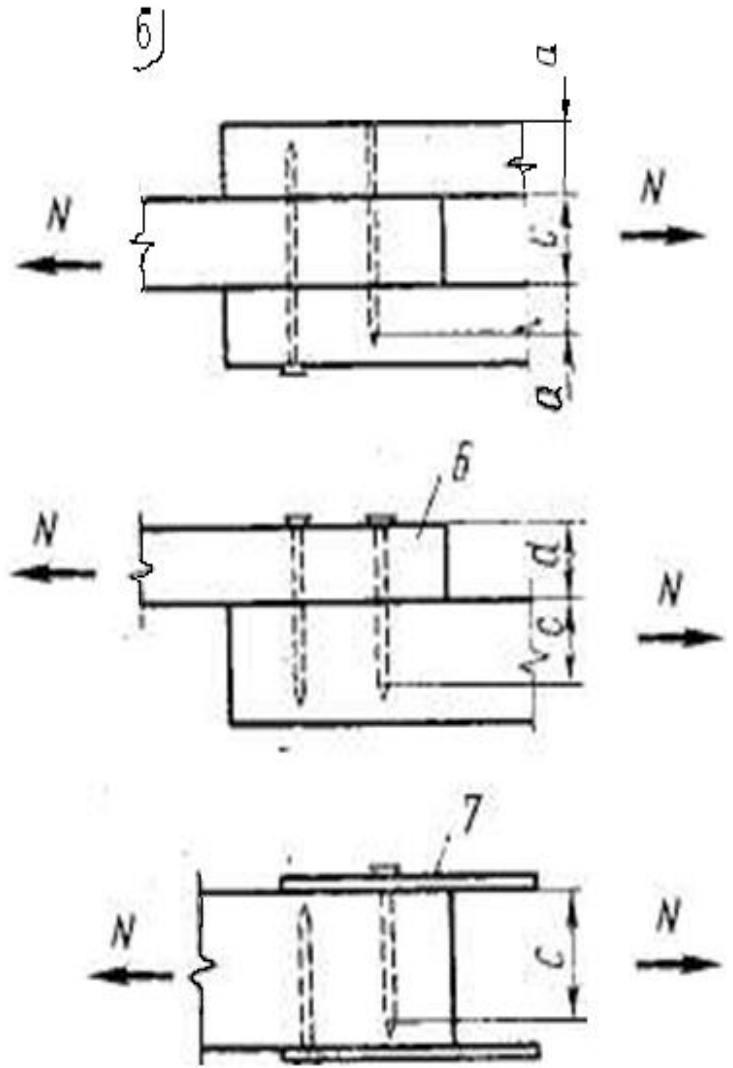
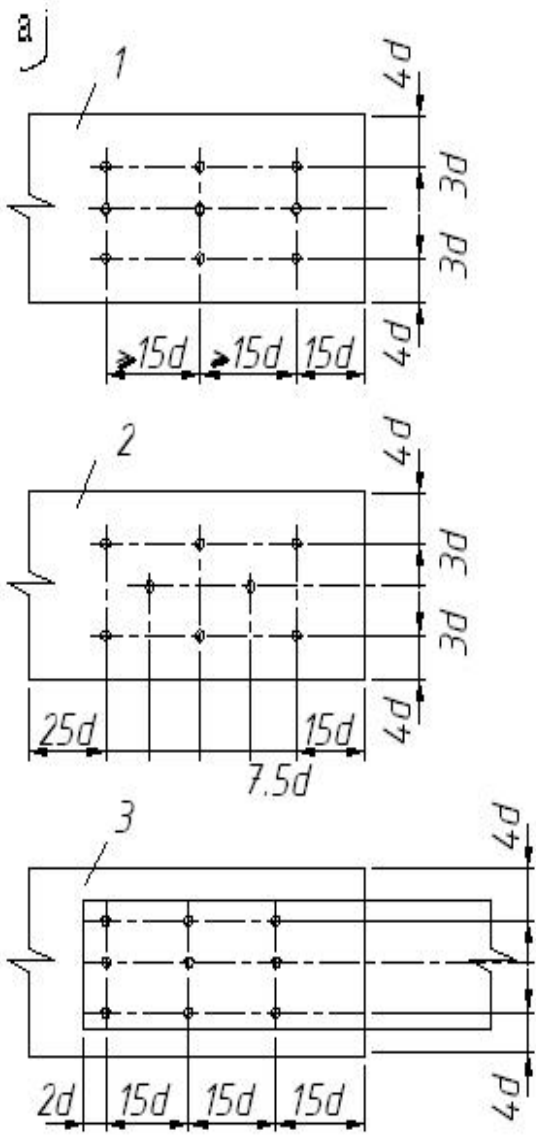
Требуемое количество выдергиваемых гвоздей, необходимых для восприятия растягивающего усилия, находят из выражения

$$n = N / T_g \quad (20)$$

Размеры выдергиваемых гвоздей подбирают из условий, чтобы расчетная длина гвоздя l_1 была не меньше $10d$ и не меньше двойной толщины прибиваемых досок.

Соединения с изгибаемыми гвоздями (см. рис.21) относятся к тому же классу нагельных соединений, что и изгибаемые болтовые соединения. Они применяются в стыках и узлах дощатых конструкций, препятствуя взаимным смещениям соединяемых элементов. Соединения с изгибаемыми гвоздями работают и рассчитываются аналогично соединениям с изгибаемыми болтами — гвозди работают на изгиб, а окружающая древесина — на смятие с некоторыми особенностями.

Гвозди имеют повышенное по сравнению с болтами сопротивление изгибу, поскольку их холоднотянутая проволока имеет более высокий предел текучести. Ввиду малой толщины и плотного заземления в древесине несущая способность гвоздевых соединений не зависит от угла действия усилий по отношению к направлениям волокон в соединениях под углом и коэффициент при расчете не учитывается. Если гвоздь пробивает все элементы соединения насквозь, расчетная толщина последнего элемента уменьшается на 1,5, учитывая опасность отщепления крайних волокон при выходе острия. Если гвоздь не пробивает соединения насквозь, учитывается только глубина его заземления a_1 в последнем элементе, определяемая так же, как и $11u$ выдергиваемых гвоздей, при условии, что она не менее $4d$.



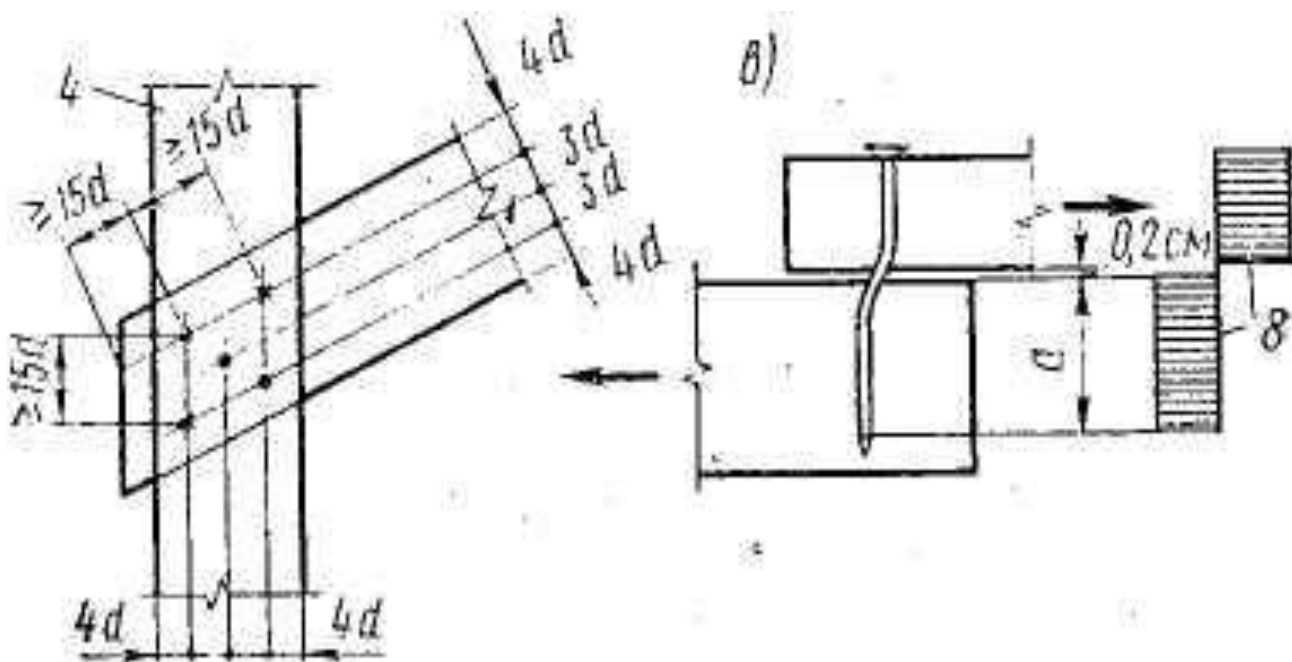


Рисунок 21 - Изгибаемые гвозди

а — схемы расстановки; б — расчетные схемы; в — схема - работы; 1 — прямая расстановка; 2 — шахматная; 3 — в стальных накладках; 4 — в соединениях под углом; 5 — симметричная двухсрезовая схема; 5 — несимметричная - односрезовая; 7 — несимметричная со стальными накладками; 8 — условные эпюры напряжений смятия

Несущую способность гвоздя в одном срезе по изгибу определяют по формуле

$$T_n = 25d^2 + a^2, (21)$$

но не более $40 d^2$.

Несущая способность одного среза гвоздя по смятию среднего c и крайнего a элемента рассчитывают при условии $k_\alpha = 1$. Несущая способность одного среза гвоздя является наименьшей из вычисленных. Общее требуемое количество гвоздей в соединении получают путем решения уравнения 20.

Соединения с изгибаемыми гвоздями и стальными накладками применяют в узлах некоторых конструкций. Гвозди здесь забивают через отверстия, просверленные в стальных листовых накладках. Это соединение по отношению к гвоздям является несимметричным и односрезовым. Несущую способность одного среза гвоздя по смятию древесины определяют по формуле (22) с учетом глубины

его заземления с1 а по изгибу, с учетом его частичного заземления— по формуле:

$$T_{и} = 40d^2 . (22)$$

Винтовые соединения.

Соединения с винтами (см. рис.22). Винты представляют собой стандартизованные стальные изделия и состоят из головки, не нарезанной и нарезанной частей. Их диаметр измеряют по не нарезанной части. Винты диаметром меньше 12 мм называют шурупами. Они имеют сферические или плоские головки с прорезями для заворачивания их отверткой. Винты диаметром 12 мм и более называют глухарями, которые имеют шестигранные или квадратные головки для заворачивания их ключом.

Винты применяют для крепления стальных накладок и деталей к деревянным элементам в узлах конструкций. Они заворачиваются через отверстия в накладках в отверстия, просверленные в древесине. Диаметр отверстий в древесине должен быть равным $0,8d$ не нарезанной части винта, для того чтобы нарезка полностью врезалась в древесину.

Винты расставляют в соединениях на больших расстояниях, чем болты. Вдоль волокон между их осями должно быть не менее $10d$, а поперек — $5d$, поскольку уменьшенный диаметр отверстия вызывает дополнительные напряжения растяжения поперек волокон. Глубина заземления не нарезанной части винта в древесине должна быть не менее $4d$.

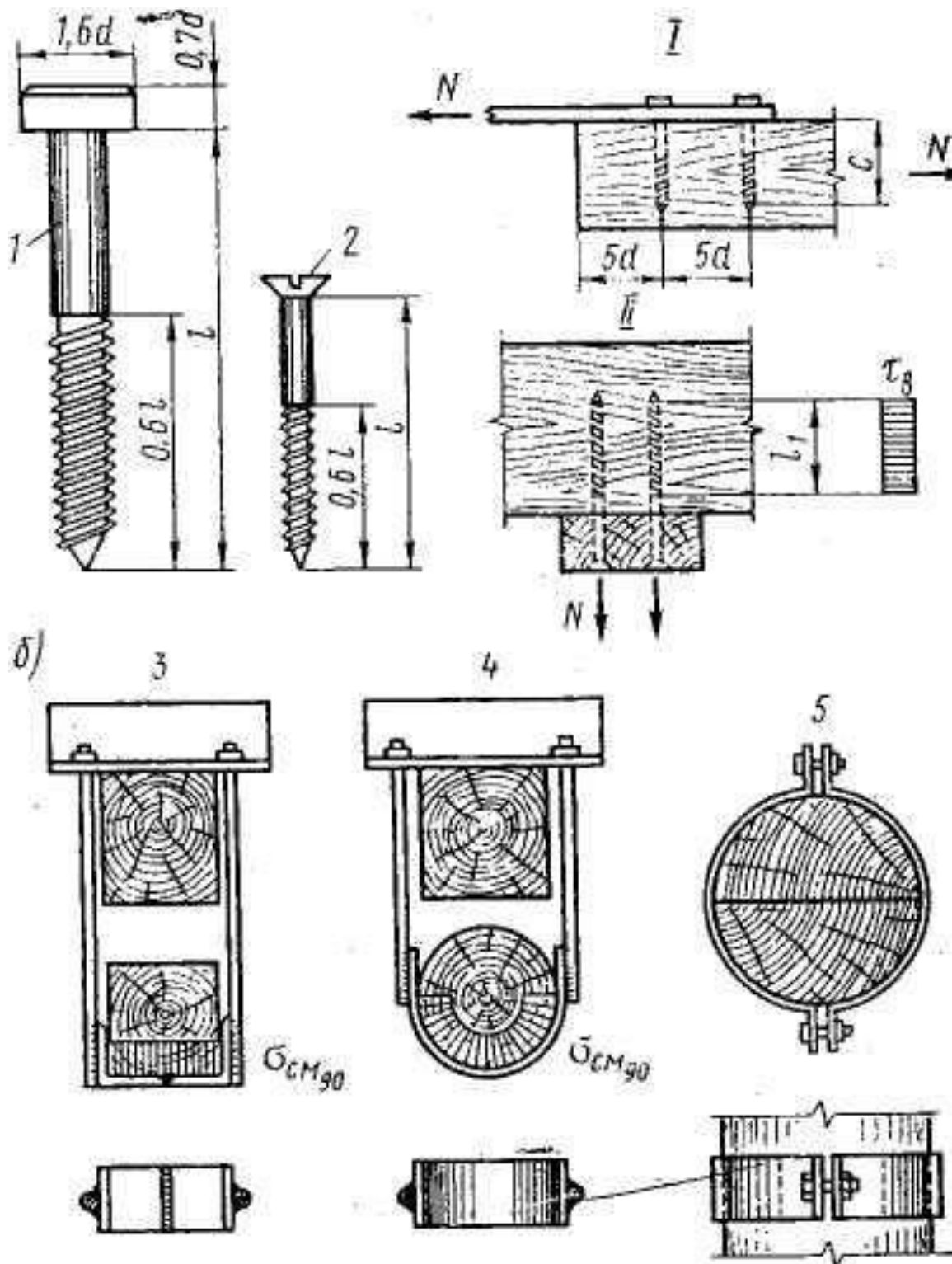


Рисунок 22 - Винты и хомуты:

а — винты; I — схема работы изгибаемого винта; II — схема работы выдергиваемого винта;
 б — хомуты; 1 — глухарь; 2 — шуруп; 3 — прямой хомут; 4 — полугнутый; 5 — гнутый

Соединения с выдергиваемыми винтами относятся к классу соединений с растянутыми связями. Винты здесь сопротивляются отрыву от древесины

накладок или деталей, в которых действуют растягивающие усилия. Выдергиванию винта сопротивляется главным образом древесина винтовых желобков нарезанной части длиной l_1 , работающая на смятие, благодаря чему расчетное сопротивление выдергиванию винтов выше, чем гвоздей, и составляет $R_{с.с} = 1 \text{ МПа}$.

Соединения с изгибаемыми винтами относятся к классу нагельных соединений. Винты здесь сопротивляются смещению накладок по поверхности древесины от действия сдвигающих усилий. Винты работают на изгиб, а окружающая древесина — на смятие, как в несимметричных болтовых соединениях со стальными накладками.

Соединения с хомутами относятся к классу соединений с растянутыми связями. Они охватывают поверхности соединяемых элементов и применяются главным образом при построечном изготовлении деревянных конструкций. Хомуты бывают проволочными, полосовыми со стяжными болтами и болтовыми с подкладками из листовой или профильной стали. По форме хомуты бывают круговыми в бревенчатых конструкциях и прямоугольными в конструкциях из пиломатериалов. Хомуты работают и рассчитываются на растяжение, а древесина — на местное смятие.

Соединения со скобами относятся к классу конструктивных соединений. Скобы изготовляют из арматурной стали класса А-I диаметром 10—16 мм и имеют образную форму с заостренными и зазубренными концами. Они забиваются в цельную древесину и обеспечивают проектное положение соединяемых элементов при построечном изготовлении деревянных конструкций из бревен и брусьев.

Соединения с когтевыми шайбами относятся к классу соединений на шайбах шпоночного типа. Они представляют собой стальные пластинки, в которых методом штамповки образованы многочисленные односторонние острия — когти. Шайбы забиваются или впрессовываются с двух сторон в древесину

соединяемых элементов. Известны два основных типа когтевых шайб — Леннова и «ГЭНГ-НЕЙЛ». Шайбы Леннова имеют круглую форму и центральное отверстие для болта. При сборке конструкций элементы соединяются стальными накладками, прикрепляемыми к гайкам болтами. Шайбы «ГЭНГ-НЕЙЛ» имеют прямоугольную форму, впрессовываются одновременно в соединяемые элементы при сборке и не требуют стальных накладок и болтов. Острия шайб работают на изгиб, а окружающая древесина — на смятие. Несущую способность шайб определяют экспериментально.

Наличие гвоздевых соединений необходимо учитывать в обеспечении техники безопасности при тушении пожаров. При тушении пожаров деревянных зданий личный состав, задействованный на тушении должен иметь обувь, защищенную от проколов.

Клеевые соединения.

Клеевые, соединения являются наиболее прогрессивными видами соединений элементов деревянных конструкций заводского изготовления. Их основой являются конструкционные синтетические клеи. Эти соединения характеризуются рядом важных достоинств. Склеивание дает возможность из досок ограниченных сечений и длин изготавливать клееные элементы несущих конструкций любых размеров и форм. Они могут быть прямыми и изогнутыми, постоянного, переменного и профильного сечения, длиной, измеряемой десятками метров, и высотой, измеряемой метрами.

Клеевые соединения являются прочными, монолитными и имеют такую малую податливость, что ее можно не учитывать при расчетах и считать клееные элементы как цельные. Клеевые соединения являются водостойкими, стойкими против загнивания и воздействия ряда химически агрессивных сред, что обеспечивает долговечность клееных элементов. Эти соединения технологичны, и их осуществление без затруднений механизмуется и автоматизируется, требуя ограниченных трудозатрат. Однако склеивание допускается только в специально

оборудованных отапливаемых цехах с приточно-вытяжной вентиляцией для удаления вредных веществ и под строгим лабораторным контролем. При склеивании имеется возможность использовать древесину маломерную и пониженного качества путем удаления значительных пороков с последующим стыкованием. Клеевые соединения являются безметалльными. Это оправдывает экономическую целесообразность применения склеивания и является причиной быстрого роста объемов производства клееных деревянных конструкций.

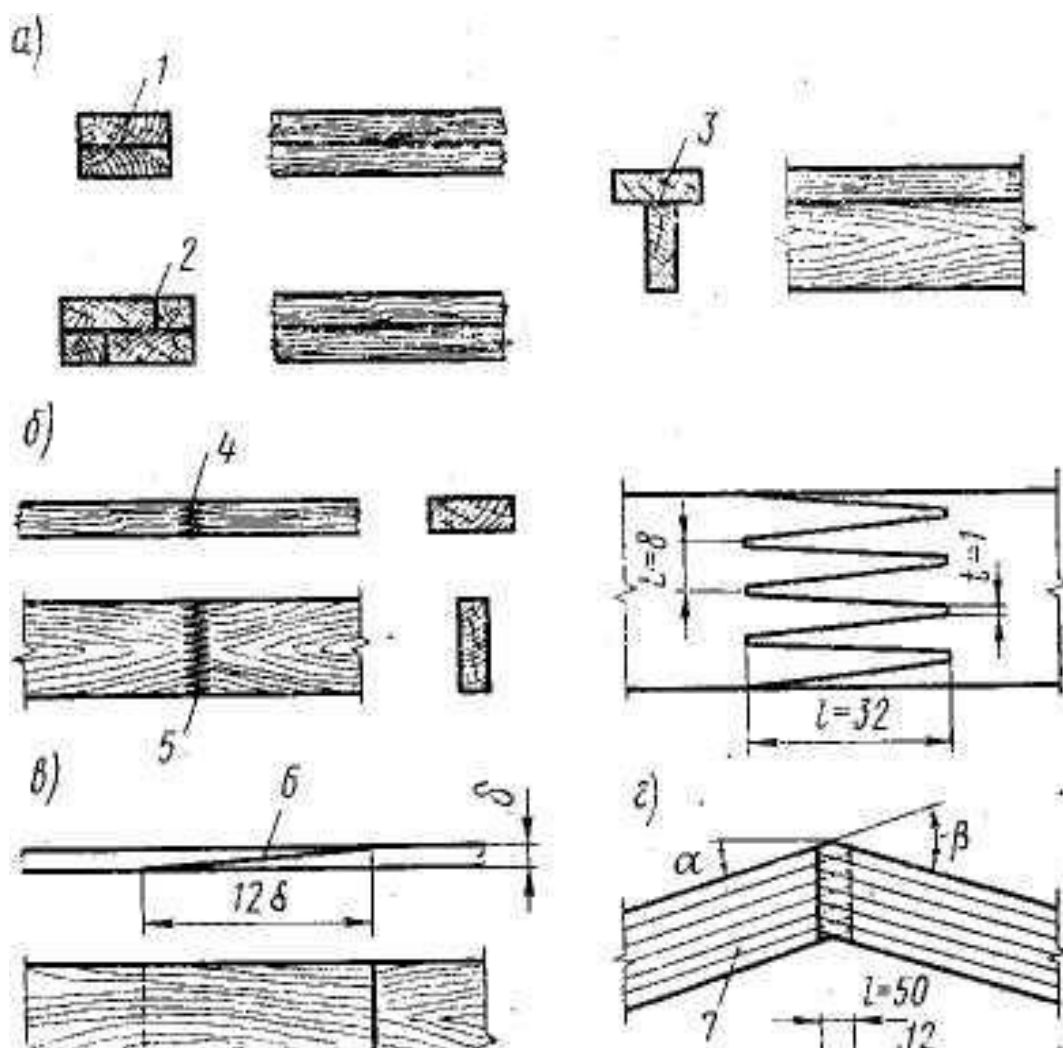


Рисунок 23 - Клеевые стыки:

- а — поперечные; б — продольные; в — фанеры; г — под углом;
 1 — по пластям; 2 — по коомкам; 3 — по пласти и кромке; 4 и 5 — зубчатый с выходом зубьев на кромки и пласти; 6 — усовое соединение фанеры; 7 — клееный элемент

Клеевые соединения применяют для склеивания досок из хвойной древесины толщиной не более 50 мм и влажностью не выше 12%. При нарушении этих ограничений клеевые соединения могут разрушиться от усилий, возникающих в результате коробления досок при высыхании. По качеству древесины доски должны относиться к категориям, соответствующим условиям их работы в клееных элементах и значениям действующих в них напряжений. Доски до склеивания должны быть остроганы по плоскостям склеивания, на толщину до 3 мм для обеспечения их плотного контакта и получения прочного клеевого шва минимальной толщины с наименьшими непрочными участками.

Клееные элементы после склеивания должны быть остроганы по кромкам для получения гладкой поверхности.

Клеевые соединения применяют также для продольного склеивания цельных клееных элементов и для склеивания досок с фанерой и со стальными деталями.

Для клеевых соединений применяют конструктивные синтетические клеи на основе термореактивных смол. В настоящее время в отечественной практике для склеивания древесины и фанеры наибольшее применение находят фенолоформальдегидный клей КБ-3 и резорциновый клей РФ-12, а для склеивания древесины с металлом — эпоксидный клей ЭПЦ-1. Клеевые швы должны иметь минимальную толщину, измеряемую долями миллиметров, и высокую прочность, превосходящую прочность древесины на сжатие и скалывание вдоль волокон. Прочность швов на растяжение, ввиду их хрупкости, невелика и соответствует, примерно, прочности древесины на растяжение поперек волокон. Адгезионная и когезионная связи клеевых швов должны быть выше прочности древесины, и клеевые соединения должны разрушаться при нагружении выше предела прочности не по швам и граничным слоям, а по цельной древесине.

Клеевые стыки по их расположению и особенностям работы могут быть разделены на поперечные, продольные и угловые (см. рис.23).

Поперечные стыки досок служат для создания клееных элементов с поперечными сечениями требуемых размеров и форм, и придания им изогнутой формы по длине. В их число входят стык по пластям, стык по кромкам и стык по пласти и кромке.

Стык по пластям представляет собой клеевое соединение досок пластиами. Этот стык применяется для создания клееных элементов требуемой высоты сечения и для обеспечения их изогнутой формы по длине, поскольку он препятствует распрямлению, изогнутых досок в клееном элементе. В изгибаемых и сжато-изгибаемых элементах стыки по пластям работают и рассчитываются на скалывание при изгибе по формуле

$$\tau = \frac{QS}{jbm_{ск}} \leq R_{ск} \quad (23)$$

В этой формуле коэффициент условий работы $\gamma_{ск} = 0,6$ учитывает возможное возникновение непрочных, уменьшающих расчетную ширину шва.

Стык по кромкам представляет собой клеевое соединение досок кромками. Его применяют для создания клееных элементов с шириной сечения, большей ширины отдельных досок. По высоте сечения эти стыки в соседних досках располагаются вразбежку в плоскости изгиба. В этих стыках обычно не возникают скалывающие напряжения, и они не требуют расчетных проверок.

Стык по пласти и кромке представляет собой клеевое соединение пласти одной доски с кромкой другой. Его применяют для создания клееных элементов тавровой, двутавровой и рельсовидной формы со стенками из досок на ребро. Работает и рассчитывается стык на скалывание при изгибе по формуле (23).

Продольные стыки служат для создания клееных элементов требуемой длины. В число продольных стыков входят зубчатое и усовое соединения.

Зубчатое соединение применяют для стыкования досок концами по длине вдоль волокон, оно является основным видом продольного стыка и представляет

собой соединение концов досок клеевыми швами по зубчатой поверхности ряда острых клиньев, которые могут выходить на пласти или на кромки досок. Такая форма придается концам досок механически специальной зубчатой фрезой на станке. Зубчатое соединение характеризуется тремя параметрами— длиной зубьев l , шириной их у основания a и шириной у вершины b (затуплением). Длина зубьев обычно не превышает толщины досок, а параметры обеспечивают необходимый уклон плоскостей зубьев к оси доски — не больше 1:8 и затупление не больше 1 мм. Только такие параметры обеспечивают необходимую прочность стыка в элементах несущих конструкций, например $l=32$ мм, $t=8$ мм, $b=1$ мм. Зубчатое соединение экономично, поскольку имеет малую длину и дает возможность стыковать короткие доски, и технологично, так как изготавливается механически и не расходится, при изготовлении, до затвердевания клея.

От действия продольных усилий в клеевых швах зубчатого соединения возникают основные скалывающие и незначительные растягивающие напряжения. Ввиду значительной площади зубчатой поверхности они не превосходят несущей способности швов до разрушения доски от растяжения. Затупление зубьев меньше ослабляет сечение, чем пороки, допускаемые в элементах I категории качества. Поэтому зубчатое соединение считается равнопрочным с цельной древесиной в элементах всех категорий качества при всех видах напряженного состояния и расчета не требует. В некоторых случаях это соединение применяют и для продольного стыкования цельных клееных элементов.

Усовое соединение представляет собой клеевое соединение концов досок по поверхности, образованной их срезкой с уклоном к поверхности 1:10, и применяют его для продольного стыкования досок. Клеевой шов работает здесь аналогично швам зубчатого соединения, и усоевое соединение считается тоже равнопрочным с древесиной элементов независимо от их категории качества. Этот стык менее экономичен, поскольку имеет значительную длину и

нерационален для стыкования коротких досок. Он менее технологичен, чем зубчатый, так как имеет тенденцию к сдвигам по клеевому раствору при склеивании, и допускается только при отсутствии оборудования для зубчатого стыкования.

Угловые стыки представляют собой клеевые соединения досок и клееных элементов, расположенных друг к другу под углом.

Зубчатое соединение под углом применяют главным образом для соединения концов клееных элементов рам в жестких узлах, расположенных под углами более 120° . Зубья этого соединения должны выходить только на верхние и нижние кромки элементов в зоне упора их срезанных под углом концов. Это соединение работает на усилия сжатия с изгибом и рассчитывается как цельное наклонное сечение по прочности на нормальные напряжения с учетом того, что они действуют под углом к волокнам, и расчетные сопротивления древесины имеют, соответствующие пониженные значения.

Соединение досок по пластям под углом представляет собой клеевое соединение досок пластями по площади их пересечения. Так могут соединяться доски шириной до 100 мм при угле 90° и шириной 150 мм при углах $30\text{—}45^\circ$ между ними. От продольных усилий в клеевом шве возникают скалывающие и дополнительно поперечные растягивающие напряжения, ввиду эксцентричного действия усилий. Они рассчитываются на скалывание под углом к волокнам, а растягивающие усилия рекомендуется воспринимать болтами или шурупами.

Стыки фанеры и фанеры с древесиной.

Усовое соединение фанеры имеет ту же конструкцию и уклон склеиваемых кромок 1:12, и применяют его для соединения фанерных листов кромками подлине и по ширине. Оно имеет пониженную прочность ввиду неполного совпадения соответствующих слоев листов фанеры при склеивании и рассчитывается на растяжение по площади сечения, уменьшенной коэффициентом условий работы $m=0,6$. В некоторых случаях применяют также

соединение фанерных листов с фанерными накладками шириной не менее 30 толщин соединяемых листов.

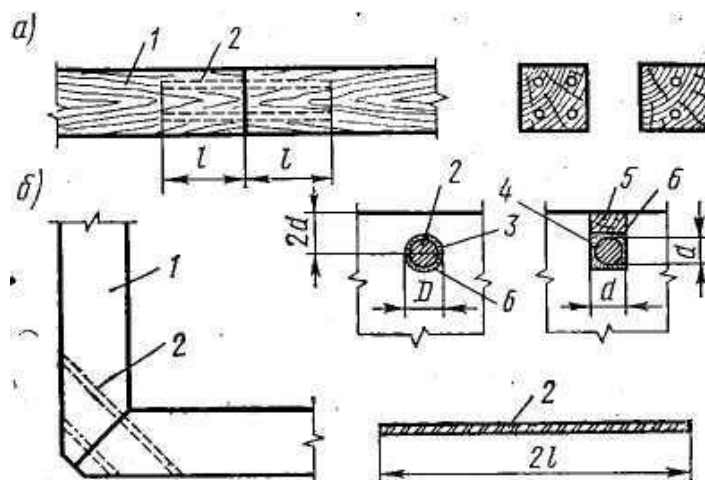


Рисунок 24 - Соединения с вклеенными стержнями:

а— продольное; б — под углом; 1 — соединяемые элементы; 2— стержни из стальной арматуры; 3 — отверстия; 4 — пазы; 5 — рейка; 6— клей

Стык фанеры с досками по пласти и кромкам применяют в клеефанерных конструкциях. При расположении волокон досок под углом 90° к наружным волокнам фанеры ширина досок должна быть не более 100 мм. При большей ширине досок возникает опасность перенапряжения клеевых швов в результате коробления древесины. Этот стык работает на скалывание при изгибе и рассчитывается по прочности ближайших к стыку клеевых швов между наружным и соседним слоями фанеры. Расчетное сопротивление этого шва скалыванию принимается при направлении скалывающих усилий вдоль наружных волокон фанеры $R_{ск.ф} = 0,6$ МПа и поперек их $R_{ск.ф} = 0,8$ МПа. Клеюметаллические соединения представляют собой соединения деревянных клееных элементов при помощи вклеенных или наклеенных стальных деталей (см. рис.24).

Соединения на вклеенных стержнях состоят из коротких стержней из арматуры классов А-II или А-III диаметром 12—32 мм, вклеенных в

прямоугольные пазы или круглые отверстия клеим, обеспечивающим надежное соединение древесины с металлом, например эпоксидно-цементным.

Глубина вклеивания должна быть не менее 10 и не более 30 диаметров стержня, ширина паза или отверстия на 5 мм больше диаметра стержня, расстояние между стержнями не менее $3d$, а до края сечения — $2d$. Вклеенные стержни применяют для продольного и углового соединения клееных элементов, работающих на продольные силы или изгибающие моменты. Они воспринимают продольные силы N при растяжении (выдергивание) или сжатии (вдавливание).

Скрытые в толще древесины стержни защищены от химически агрессивной среды и быстрого нагрева при пожаре, что повышает стойкость против коррозии и огнестойкость конструкции. Клеевые соединения стержней работают на скалывание по площади, равной произведению глубины вклеивания на периметр отверстия $\pi(d+0,5)$ см.

Напряжения скалывания распределяются по длине вклеивания неравномерно, уменьшаясь к концам стержней.

Расчет соединения на скалывание, производят с учетом коэффициента неравномерности (концентрации) распределения скалывающих напряжений $K_{ск}$, определяемого в зависимости от диаметра стержня и глубины вклеивания.

Расчетная несущая способность стержня определяется по скалыванию клеевых соединений по формуле

$$T = \pi d(d + 0.5) R_{ск} K_c, (24)$$

где $K_c = 1,2 - 0,02l/d$, $R_{ск} = 1,2 \text{ МПа}$ — расчетное сопротивление скалыванию.

Соединения с клеестальными шайбами применяют для соединения стержней сборно-разборных ферм в узлах. Они состоят из стальных пластинок — стальных накладок, болтов, а также шайб, приклеенных к пластям элементов феноло-формальдегидным по слою БФ или эпоксидным клеем. Болты пропускаются при сборке соединения через отверстия соответствующего

диаметра в накладках и шайбах и через отверстие большего диаметра в древесине элементов. Соединение воспринимает растягивающие и сжимающие усилия. Клеевые швы шайб работают и рассчитываются на скалывание по формуле (24). Болты рассчитываются на смятие и срез между шайбами и накладками, как в стальных соединениях, без учета древесины и имеют повышенную несущую способность. Стальные накладки рассчитываются на растяжение или сжатие. Для беспрепятственной сборки соединение должно быть изготовлено с высокой точностью.

Клеевые соединения арматуры клееных армированных балок с древесиной выполняются путем вклеивания ее в пазы в крайних зонах сечений эпоксидно-цементным клеем. Они работают на скалывание с избыточными запасами прочности.

Соединения с пластмассовыми связями имеют значительные перспективы применения в деревянных конструкциях, особенно предназначенных для эксплуатации в средах, химически агрессивных по отношению к металлу. В настоящее время проводятся экспериментальные и теоретические исследования соединений в деревянных элементах с цилиндрическими нагелями из высокопрочного стеклопластика типа АГ-4с.

Современные технологии обработки деревянных изделий, применение 3D деревообрабатывающих ЧПУ, внедрение в строительство инженерной древесины позволило создавать новые узловые соединения деревянных конструкций, пожароопасные характеристики которых значительно выше традиционных стыковых соединений. К тому же эти соединения не только обладают достаточной механической прочностью, но и позволяют значительно ускорить технологический процесс сборки деревянных конструкций как на производстве, так и на строительной площадке.

Рассмотрим схему на примере соединения балки на пазл (см. рис.25).



Рисунок 25 - Схема соединения балки на пазл

При соединении двух частей балки, соединение создает сжимающие усилия и необходимое трение на площади соприкосновения деталей для набора монтажной прочности. Нанесение клея, обладающего свойствами коксобразования при нагревании свыше 180°C обеспечивает механическую прочность узла выше основного материала как при нормальных условиях, так и при нагреве в условиях пожара.

Возможно создание узловых соединений, созданных телом вращения (см. рис.26). При этом, нагель будет иметь свойства замка и воспринимать усилия необходимые для монтажа деревянной конструкции.

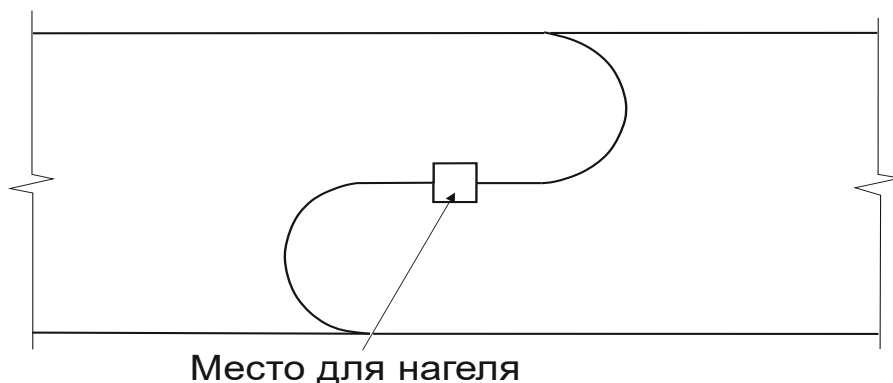


Рисунок 26 - Схема узлового соединения, созданного телом вращения

Предполагается, что огнестойкими свойствами будут обладать соединения деревянных деталей по типу японской технологии Чидори (Chidori), при которой деревянные элементы соединяются в надежный стык при помощи сочленения без применения клея или крепежных элементов.

В условиях промышленного производства достаточно технологичным являются винтовые соединения. Винтовые соединения возможно применять как для соединения двух и более элементов, например, колонн или балок (см. рис.27), так и соединения деревянных деталей при помощи винтового нагеля, схема которого представлена на рисунке 28.

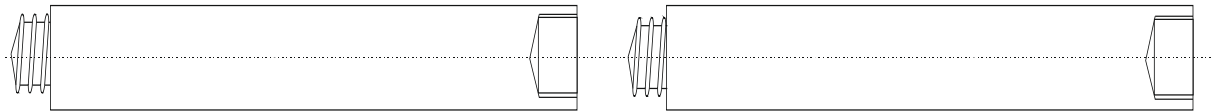


Рисунок 27 - Схема винтового соединения

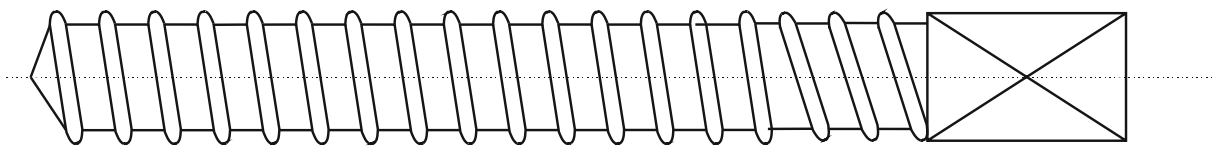


Рисунок 28 - Схема винтового нагеля

Основными условиями надежности используемых соединений должны быть контроль качества винтов и соединяемых элементов, а также применяемые методы их расчета и методы испытаний соединений, подтверждающие результаты расчетов. Конструктивными параметрами винтовых соединений, которые должны учитываться при проектировании, являются: расчетные размеры винтов, размеры посадочных отверстий, а также регламентированные схемы их расстановки. Диаметр деревянных винтов с трапецидальной и треугольной резьбой рекомендуется принимать в диапазоне от 12 до 52 мм. Наибольший интерес представляют деревянные винты с переменным шагом. Это позволяет создать дополнительное усилие и обеспечить наибольшее трение между соединяемыми деталями.

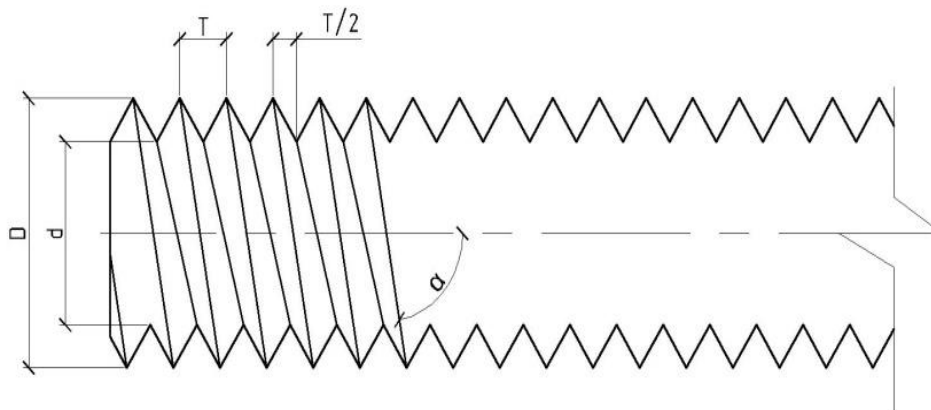


Рисунок 29 - Обозначение параметров резьбы

Важнейшим условием огнестойких деревянных соединений является точность и качество изготовления поверхностей, обеспечивающие полное отсутствие щелей и неплотностей.

Отдельным направлением повышения огнестойкости узлов деревянных конструкций является применение «смартклея», внешняя поверхность которого в месте стыка в условиях пожара вспучивается с образованием коксовой шапки. Коксовая шапка надежно защищает соединение от температурного воздействия пожара на заданный промежуток времени.

Разрабатываемый для применения в производстве клееных деревянных конструкций для зданий и сооружений клей должен обеспечивать стойкость клеевых соединений к различным температурно-влажностным воздействиям, а также прочность клеевых соединений, в том числе длительную. Для обеспечения нормируемого предела огнестойкости деревянных строительных конструкций в состав клея вводятся компоненты, способствующие образованию кокса при воздействии пламени на деревянную клееную конструкцию. Клеи для деревянных конструкций, применяемые в жилых зданиях, должны быть экологически чистыми. Прежде всего это связано с эмиссией фенолов и формальдегидов в жилые помещения.

Клеи для изготовления деревянных конструкций и изделий должны обеспечивать прочность клеевого шва не ниже прочности древесины на

скалывание вдоль волокон и на растяжение поперек волокон. Для обеспечения долговечности конструкций клей должен быть водо- и атмосферостойким.

5 ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Известной проблемой в понимании пожарной опасности деревянных зданий является подмена понятий огнестойкости и горючести. Это происходит вследствие высокого влияния горючести на предел огнестойкости деревянных конструкций. Поэтому рассмотрим данные параметры и способы их корректировки в совокупности.

Снижение горючести древесины возможно достичь тремя способами:

- теплоизолирующие одежды;
- огнезащитные обмазки и штукатурки;
- огнезащитные лакокрасочные материалы;
- огнезащитные пропитки.

Технологические приемы и материалы снижения горючести разнообразны и включают широкую гамму составов для пропиток и покрытий, обладающих высокой сопротивляемостью к действию тепла и высоких температур. Антипирены для древесины представлены красками и пропитками. Краски легко наносить, они скрывают пороки древесины, однако со временем они теряют свои огнезащитные свойства и их огнезащита в условиях пожара недолговечна. Пропитки сохраняют декоративные свойства древесины и обеспечивают более высокую огнезащиту по сравнению с красками, но механические свойства древесины значительно сокращаются, к тому же инженерные изделия из древесины, пропитанные антипиренами очень сложны для последующей механической обработки.



Рисунок 30 - Схема огнезащиты

Теплоизолирующие одежды.

Механизм огнезащиты заключается в предотвращении нагрева древесины до температуры разложения.

В строительстве для этого используется множество различных материалов, которыми защищают деревянные элементы конструкций, т.е. которые выполняют роль теплоизолирующих одежд.

Мокрая штукатурка.

Её изготавливают как на основе воздушных, так и гидравлических вяжущих. Заполнителями помимо песка служат эффективные огнезащитные материалы, например, вспученные горные породы (перлит, вермикулит).

Покрытие негорючими материалами.

Для защиты древесины от воспламенения применяются покрытия поверхности конструкций войлоком, пропитанным в глиняном растворе, с последующей обивкой жестью, а также обшивки различными плитами и листами заводского изготовления (сухая штукатурка; перлитовые, вермикулитовые гипсовые плиты; асбестоцементные листы и т.п.).

Регулируя толщину защитного слоя теплоизолирующей одежды, можно снизить возгораемость деревянных конструкций в требуемых пределах.

Покрытие вспучивающимися красками.

Этот способ снижения возгораемости древесины также следует причислить к теплоизолирующим одеждам, т.к. при нагревании нанесенный на поверхность конструкции тонкий слой краски вспучивается, т.е. значительно увеличивается его толщина и создается пористый угольный слой, препятствующий прогреву древесины до температуры разложения. При обычных условиях эксплуатации эти покрытия служат в качестве декоративного отделочного слоя.

В состав вспучивающихся покрытий входят мочевиноформальдегидная смола, фосфорнокислый аммоний, дициандиамид. В качестве стабилизаторов угольного слоя используются кремнийорганические соединения (силиконы) и алкилтитанокты. При высоких температурах они образуют двуокиси кремния и титана, обладающие повышенной теплостойкостью.

Важным требованием к вспучивающимся краскам, предназначенным для огнезащиты древесины, является то, что они должны вспучиваться при температуре ниже температуры разложения древесины.

Преимущество вспучивающихся покрытий по сравнению с огнезащитными красками состоит в том, что с их помощью можно получить трудносгораемый материал. Наибольший эффект возможен при применении вспучивающихся составов в клееных деревянных конструкциях.

Огнезащитные краски.

Механизм огнезащиты красками состоит в следующем:

- а) препятствие выходу в зону реакции горючих продуктов термоокислительной деструкции древесины;
- б) препятствие проникновению в зону реакции кислорода воздуха, необходимого для горения;
- в) удержание слоя переугленной древесины на поверхности, который замедляет скорость дальнейшего переугливания древесины вглубь;

г) ингибирование (химическое торможение) процесса горения (относится к некоторым видам огнезащитных красок, например, фосфатным).

Наибольшее распространение получили следующие виды огнезащитных красок:

Фосфатные покрытия.

Составы по ГОСТ 23790-79:[29]:

- связующее – полиметафосфат натрия 35-40% (по массе);
- наполнитель – каолин или глина 4-6% и зола уноса 14-16%;
- антипирен – гидроксид алюминия 14-16% и мочевины, либо тиомочевина 18-22%;
- пигмент – железный сурик или окись цинка 4-6%.

Толщина покрытия должна быть $(0,6-0,8) \cdot 10^{-3}$ м; расход покрытия – 0,5-0,7 кг/м².

Краска МФК.

Состав:

- моноаммонитфосфат – 30,6%;
- мочевины – 18,25%;
- дициандиамида – 6,05%;
- формалина – 37,9.

Расход краски 0,6 кг/м².

Краска СК-Л.

Состав:

- жидкое натриевое стекло – 54%;
- литопоп – 39%;
- вермикулита – 7%;

Расход краски – 0,5 кг/м².

Огнезащитные обмазки.

Механизм огнезащиты древесины обмазками в основном сходен с механизмом огнезащиты с помощью красок. Вместе с тем с помощью обмазок достигается, как правило, более высокий огнезащитный эффект благодаря увеличению толщины слоя наносимого покрытия, что обусловлено более грубым изменением входящих в обмазки компонентов. В составе обмазок, как правило, отсутствует пигмент. Применяют наиболее широко следующие виды обмазок:

Суперфосфатная обмазка.

Состав:

- суперфосфат – 70%;

- вода – 30%;

Расход обмазки – 1,2 кг/м².

Известково-глино-солевая обмазка (ИГС).

Состав:

- известковое тесто – 74%;

- глина – 4%;

- соль поваренная – 11%;

- вода – 11%.

Расход обмазки – 1,4 кг/м².

Следует учесть, что поверхностная огнезащитная обработка строительных конструкций должна производиться при температуре не ниже 10°C и относительной влажности воздуха не более 70%, а количество слоев должно обеспечивать требуемый расход краски или обмазки на единицу поверхности конструкции.

Огнезащита древесины пропиточными составами.

Этот способ является химическим способом огнезащиты древесины и заключается во введении в ее массу специальных веществ, называемых антипиренами. Сущность механизма огнезащиты заключается в том, что отложившиеся в массе древесины соли при нагревании разлагаются с выделением

продуктов, ингибирующих окислительную реакцию в газовой фазе, разбавляя горючие продукты разложения древесины, в результате чего пламенная фаза горения древесины становится практически невозможной, а происходит только переугливание деревянной конструкции.

Наиболее распространенными антипиренами являются диаммоний-фосфат $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, моноаммоний фосфат $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, сернокислый аммоний $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и борная кислота H_3BO_3 .

Вместе с тем, следует учесть, что древесина является природным полимером и взаимодействие с химически активными препаратами приводит к значительному снижению прочности древесины, с другой стороны антипирены могут быть более или менее эффективными.

Поэтому различают (см. табл. 5):

Таблица 5 - Совместимость препаратов для огнезащиты древесины

| Неэффективные | | Эффективные | |
|---|---|---|--|
| Совместимые | Несовместимые | Несовместимые | Совместимые |
| Краски, включающие суперфосфат, хлористый аммоний, асбест | Силикатные краски на основе натриевого жидкого стекла и жженой магнезии | Бромсодержащие, дибромнеопентинтилг ликоль, триэтилфосфат, трифенилфосфаттрик резилфосфат | Фосфат мочевины + ортофосфорная кислота, диаммоний фосфат + аммоний сульфат, борная кислота + бура + пентахлорфенолят натрия |

На практике применяются три способа защиты древесины антипиренами:

Глубокая пропитка древесины раствором антипиренов под давлением.

Для пропитки обычно применяют раствор 17 процентной концентрации следующего состава:

диаммоний фосфат – 7,5 весовые части;

сульфат аммония – 7,5 в.ч.;

фтористый натрий – 2 в.ч.;

вода – 88в.ч.

В настоящее время разработаны и другие виды пропиточных составов. Например, состав, содержащий фенолоспирты, мочевины, водный раствор аммиака, сульфатаммония, либо диаммонийфосфат. Разработан радиационно-химический метод, основанный на введении мономера (метилметакрилат) с антипиреном в процессе глубокой пропитки и последующей полимеризацией в γ облучении кобальта 60.

В качестве антипирена применяется хорошо растворимая акриловая кислота в сочетании с раствором мочевины.

Оптимальный состав:

метилметакрилат – 55%;

акриловая кислота – 35,2%;

мочевина – 9,8%.

Сущность технологического процесса глубокой пропитки перечисленными составами состоит в том, что подготовленные пиломатериалы загружают в пропиточный цилиндр, в котором после герметизации создают разрежение порядка 0,08-0,085 Мпа в течении 0,5-1 часа. При этом происходит удаление воздуха из пор древесины, что способствует проникновению пропиточного раствора. Раствор подают в цилиндр при температуре порядка 60-70°C, (333-343К), затем повышают его давление до требуемого по нормам и выдерживают в течении заданного времени. После чего давление постепенно снижают до атмосферного. После сливания раствора древесину выгружают и подвергают сушке при температуре до 70°C (343К).

Режим пропитки (давление раствора, время пропитки) устанавливают в зависимости от породы древесины и размеров изделий. При этом поглощение

сухих солей древесиной должно составить не менее 66 кг/м³, чтобы перевести материал в группу трудногораемых (трудногорючих).

Расчет привеса сухих солей производят по формуле:

$$A = \frac{K \cdot c}{100} \quad (25)$$

где А – количество сухих солей, кг/м³;

К – количество пропиточного раствора, поглощенного древесиной кг/м³;

с – концентрация антипирена в пропиточном растворе, %.

Глубокая пропитка древесины в горяче-холодных ваннах.

Сущность метода состоит в том, что древесину погружают сначала в ванну с раствором антипирена, нагретого до температуры порядка 90°С (363К) и выдерживают в течении 24 часов.

При этом, воздух, находящийся в порах древесины, нагревается, увеличивается в объеме и частично выходит из массы древесины, что способствует проникновению раствора в поры материала.

Затем древесину переключают в ванну с холодными растворами, либо быстро изменяют температуру горячего раствора до температуры окружающей среды. В холодной ванне пропитка длится также в течении 24 часов. При этом воздух, оставшийся в порах древесины, сжимается при охлаждении, что приводит к возникновению некоторого разряжения и способствует дальнейшему поглощению раствора антипирена.

В состав пропиточного раствора в основном входят диаммонийфосфат и сульфат аммония в соотношении 3:7.

Недостаток данного способа состоит в том, что он обеспечивает максимальное поглощение древесиной сухих солей не более 50 кг/м³, что позволяет отнести древесину только к группе трудновоспламеняемых материалов. Чтобы ее довести до трудногорючего состояния, необходимо дополнительно покрывать огнезащитным материалом.

Поверхностная пропитка древесины.

Сущность метода состоит в нанесении на поверхность изделия пропиточного состава при помощи краскопульты или кисти.

В пропиточный состав обычно входят следующие вещества:

- фосфорнокислый аммоний (диаммонийфосфат) – 20%;
- сернокислый аммоний (сульфатаммония) – 5%;
- керосиновый контакт Петрова (смачиватель) – 3%;
- вода – 72%.

Помимо приведенного пропиточного состава применяют и другие, например, состав, состоящий из двух частей – огнезащитного компонента и отделочного.

Рецептура огнезащитного компонента:

- калий углекислый (патош) – 25%;
- керосиновый контакт – 3%;
- вода – 72%.

Расход сухой соли при поверхностной пропитке должен составлять не менее 0,1 кг/м².

В результате пропитки древесина становится трудновоспламеняемой.

Температура пропиточного раствора должна быть 50-60°C (323-333К). Пропитку следует проводить при температуре воздуха не ниже 10°C (283К), относительной влажности не выше 70%.

Применение пропиточных составов является эффективным способом понижения горючести древесины, вместе с тем этот способ имеет весьма ограниченное применение. Во-первых, соли, проникающие в капилляры, при кристаллизации разрушают систему тканей древесины, в результате прочность уменьшается примерно на 40%, поэтому, в несущих конструкциях применять древесину глубокой пропитки антипиренами не следует. Во-вторых, наличие в древесине кристаллов солей антипиренов резко ограничивает применение

традиционных способов обработки древесины (острожки и пиления), так как твердость солей по шкале Мооса значительно выше твёрдости режущих инструментов. В-третьих, в результате глубокой пропитки древесины антипиренами первичная геометрия деревянного элемента претерпевает значительные изменения, что недопустимо в строительных конструкциях.

Огнезащита промышленных изделий из древесины.

Трехслойные огнезащитные древесностружечные плиты. Особенностью их производства является то, что наружные слои в процессе формовки трехслойных плит выполняются из стружек, обработанных антипиренами. Толщина наружных огнезащитных слоев должна быть не менее 3 мм.

Древесно-стружечная плита (далее - ДСП), облицовочные, запрессованные вермикулитом.

В процессе изготовления плиты (перед прессованием) на ее поверхность наносится состав, включающий в себя 100 весовых частей вермикулита, 30 весовых частей мочевиноформальдегидной смолы и 1 весовой части хлористого аммония. Кроме того, для улучшения декоративных свойств может добавляться краситель. Расход вермикулита составляет 1 кг/м^2 поверхности плиты.

После прессования на поверхности плиты образуется прочный, декоративный слой, существенно снижающий возгораемость материала.

Изготавливаются также огнезащитные древесно-волоконистые плиты (ДВП).

Инженерная древесина

Инженерной древесиной называют конструкционные строительные материалы, изготовленные с использованием древесины и связующих. В строительстве наиболее известны клееные деревянные конструкции (далее - КДК), брус из клееного шпона (далее - LVL) и перекрестно склеенных плиты (далее - CLT) в строительстве.

Использование инженерной древесины в несущих конструкциях дает большой эффект, так как в них удается сочетать высокие прочностные свойства древесины, ее низкую плотность, декоративность, а также более низкую пожарную опасность. Клееные деревянные конструкции позволяют получать легкие безопорные сооружения большого пролета (до 120 м).

В индустриальном деревянном домостроении выделяют три типа конструкций из инженерной древесины (КДК):

- многослойный стеновой брус.
- многослойные несущие балки.
- двух-, трех-, четырехслойные несущие балки.

Многослойные несущие балки формируются из нескольких горизонтальных слоев. Стеновой брус, а также двух-, трех- и четырехслойные балки склеиваются из соответствующего количества ламелей, которые располагаются, как правило, вертикально. Двух- и трехслойные балки склеиваются из слоев таким образом, чтобы в сооружении клеевой шов располагался вертикально. Доски располагают внутренней стороной (обращенной к сердцевине) наружу, так как в этом случае меньше риск образования трещин. Двух- и трехслойные балки используют в рамных конструкциях, решетчатых сооружениях, стропилах, опорах.

Для изготовления элементов КДК допускаются пиломатериалы только хвойных пород (сосна, ель, пихта) с прочностью чистой древесины: при растяжении - не менее 85 МПа, при изгибе - не менее 65 МПа, при сжатии - не менее 35 МПа, при скалывании - не менее 6 МПа.

Требование для всех классов несущих балок: влажность пиломатериалов перед склеиванием должна быть 8-15 %, разница влажности отдельных пиломатериалов не должна превышать 4 %.

В связи с опасностью возникновения больших внутренних напряжений при склеивании толстых досок приняты ограничения по этому параметру: толщина

досок не должна превышать 40-50 мм, для криволинейных деталей толщина досок должна быть не менее 20 мм и в то же время не превышать $1/200$ радиуса изгиба. Толщина ламелей в несущих балках 1-2-го классов должна быть не более 32 мм, в балках 3-го класса - 45-50 мм.

В технологии изготовления LVL (Laminated Veneer Lumber) используется многослойный клееный материал типа фанеры с преимущественно продольным расположением волокон древесины в слоях шпона.

Конструкции из LVL долговечны и не теряют характеристик и привлекательности на протяжении всего срока эксплуатации. Исключен риск влияния естественных пороков древесины на качество материала. Структура материала гомогенна и симметрична, физические свойства неизменны по всей длине конструкции. Материал сохраняет геометрические размеры и физические свойства вне зависимости от сезонных факторов, изменений окружающей среды и климатических условий, не деформируется и не коробится от сырости, имеет минимальные показатели естественной усушки.

Использование конструкций из этого материала обеспечивает высокую точность сопрягаемых изделий (за счет стабильности линейных размеров) по сравнению с обычной древесиной, которая подвержена разбуханию и короблению. У LVL-бруса более высокая прочность, чем у обычной древесины или традиционного клееного бруса из ламелей, а также высокая несущая способность при меньшем поперечном сечении. Материал не впитывает влагу (поэтому собственный вес балки во влажной среде остается неизменным), обладает повышенной устойчивостью к агрессивным средам (водяным парам, аммиаку, парам солей и т. д.), оптимальным соотношением прочностных и весовых показателей. Он более био- и огнестойкий по сравнению с обычной древесиной, характеристики био- и огнестойкости легко повышаются после обработки антисептиками и антипиренами.

Обладая высокими теплоизоляционными и акустическими характеристиками, этот материал хорошо сочетается со многими другими звуко- и теплоизоляционными материалами. В конструкциях из LVL нет «мостиков холода» (по пустотам и крепежным элементам), а также исключен риск образования конденсата и гниения.

В начале 2021 года запустил производство завод по производству перекрестно клееных панелей (CLT) в г.Сокол. Панель CLT массивная несущая древесная плита, линейными размерами 16 на 3,5 метра, идеально подходит для реализации архитектурных решений любой сложности и отвечает самым высоким конструкционным требованиям. Технология производства панелей CLT состоит следующем. Сращенные и строганные ламели укладываются поочередно крест-накрест на рабочий стол клеенаносящей машины. Слои проходят прессование с краев перед основным прессованием ($1,2 \text{ Н/мм}^2$) в условиях нагрева, поэтому пожароопасные свойства панелей CLT значительно снижены, по сравнению с любыми другими деревянными конструкциями. Сформированная плита поступает на станок механической обработки с ЧПУ, на котором выполняется цикл торцевых узлов, проемов и отверстий. На основании проектного решения здания плиты раскраиваются в наиболее удобный размер, с учетом логистических возможностей.

Панели CLT подходят не только для использования в типовых проектах, но и для создания сооружений и зданий, уникальных по архитектурной и конструктивной сложности. Высокая степень заводской готовности позволяет достичь на строительной площадке высокой производительности труда.

Конструктивная огнестойкость

Под огнестойкостью деревянной конструкции понимается временной промежуток, по истечении которого, в условиях распространения пожара, она сохраняет свою целостность (несущую способность и конструктивную устойчивость). Предел огнестойкости в соответствии табл.21 ФЗ-123

«Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» является нормирующим показателем при определении степени огнестойкости зданий, сооружений и пожарных отсеков [6].

Несущие деревянные конструкции в зданиях и сооружениях могут быть представлены в виде балки и стойки, арки, рамы, фермы, стены (бревенчатые, брусчатые, каркасно-обшивные, каркасно-щитовые).

В случае пожара, сгорание дерева несет за собой обрушение несущих элементов из него. Это происходит следующим образом: процесс горения дерева заключается в обугливание части несущего диаметра конструкции, обугленная часть разрушается, и вся нагрузка постепенно переходит на не обугленную часть конструкции. Если процесс горения продолжается длительное время, то происходит уменьшение несущей площади и по законам физических процессов, пропорционально увеличивается нагрузка на всё уменьшающуюся опорную площадь.

Предел огнестойкости деревянной конструкции – это время, необходимое для уменьшения несущей площади конструкции до величины, равной оказываемой на него нагрузке. На замедление или ускорение этого процесса воздействуют некоторые факторы, в том числе огнезащита, влажность и плотность самой древесины, интенсивность притока кислорода, температура горения объекта.

Наиболее быстрый процесс обугливания у конструкций из цельной древесины с минимальным сечением, для них скорость обугливания составляет 1 миллиметр в минуту. Клееная древесина обугливается медленнее, при таком же сечении скорость составляет 0,7 мм в минуту. Увеличение несущей площади уменьшает скорость сгорания древесины.

Предел огнестойкости - это время от начала возгорания до потери несущей способности и разрушения конструкции. Предел огнестойкости рассчитывается

для каждого элемента, если конструкция сборная и состоит из деревянных и металлических элементов.

На рисунке 31 представлено изменение несущей площади при пожаре конструкции, на примере ангарской сосны.

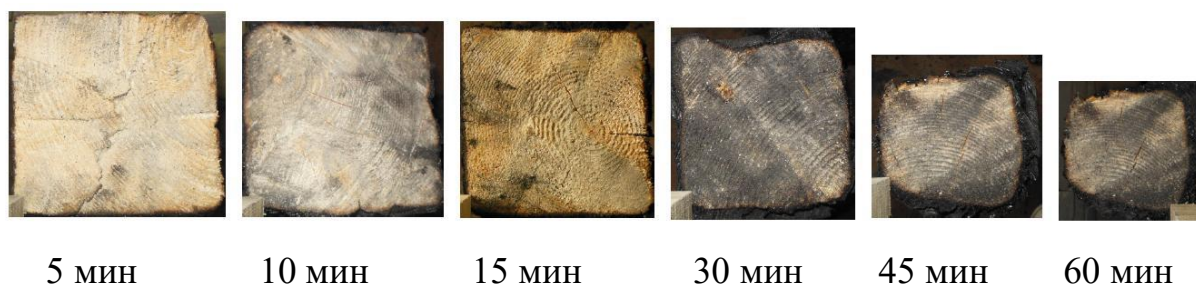


Рисунок 31 – Обугливание деревянной колонны (черным показан слой угля)

Изменение размера сечения образцов, на примере ангарской сосны, при стандартном температурном режиме пожара приведено в таблице 5. Так же была рассчитана скорость обугливания

Таблица 6 - Результаты проведения огневых испытаний

| Время пожара t, мин | Сечение axh , мм | Δb обугливание сечений, мм | $\frac{\Delta b}{2} = z$ обугливание одной стороны балки, мм | Скорость Обугливания $v = \frac{z}{t}$, мм/мин |
|---|--------------------|------------------------------------|--|---|
| 0 | 150x150 мм | - | - | - |
| 5 | 142x142 мм | 8 мм | 4 мм | 0,8 мм/мин |
| 10 | 132x132 мм | 18 мм | 9 мм | 0,9 мм/мин |
| 15 | 126x126 мм | 24 мм | 12 мм | 0,8 мм/мин |
| 30 | 112x112 мм | 38 мм | 19 мм | 0,63 мм/мин |
| 45 | 92x92 мм | 58 мм | 29 мм | 0,64 мм/мин |
| 60 | 84x84 мм | 66 мм | 33 мм | 0,55 мм/мин |
| * Δb - размер обугливания двух противоположных сторон образца | | | | |

Предел прочности древесины уменьшается с течением времени пожара по определенному закону дифференциального уравнения:

$$\frac{dR}{dt} = -k \cdot R; \quad (26)$$

Например, предел прочности при изгибе балки квадратного сечения определяют по формуле 27:

$$R_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W}; \quad (27)$$

где, M_{max} - максимальный изгибающий момент;

W - момент сопротивления.

$$M_{\text{max}} = \frac{P_{\text{разр}} \cdot l}{4}; \quad (28)$$

$$W = \frac{a^3}{6}. \quad (29)$$

Таблица 7 - Определение M_{max} и W

| Расчетная схема, нагрузки | Форма сечения | Момент сопротивления | Изгибающий момент |
|---|---|----------------------|--|
|  |  | $W = \frac{a^3}{6}$ | $M_{\text{max}} = \frac{Q \cdot l}{4}$ |

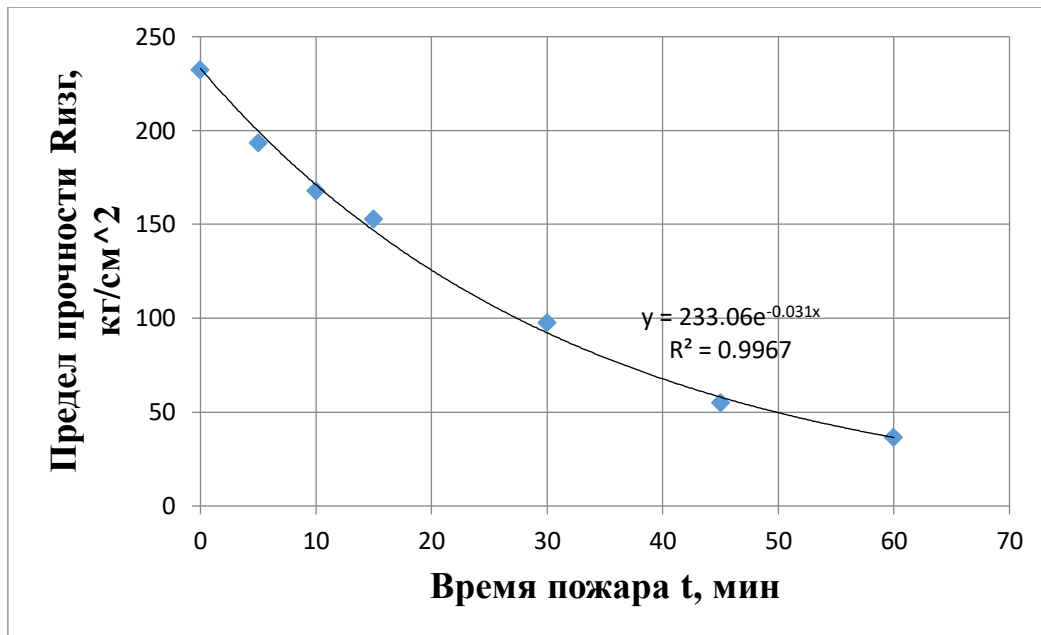


Рисунок32 -График зависимости предела прочности Ризг от времени пожара t

Полученная эмпирическая формула $y_{изг} = 233,06e^{-0,031x}$ является решением дифференциального уравнения, которое означает, что снижение dR прочности за некоторое dt пропорционально прочности древесины применяется к строительству. Коэффициент k является постоянной величиной и имеет размерность $[time^{-1}]$, $k_{изг} = 0.031$, коэффициент R_0 – начальная прочность древесины, не поддающаяся огневому воздействию, т.е. \rightarrow при $t = 0$. Знак минус (-) в правой части означает снижение прочности.

Получена зависимость $y = 104,47e^{-0,023x}$, $R^2 = 0,9692$

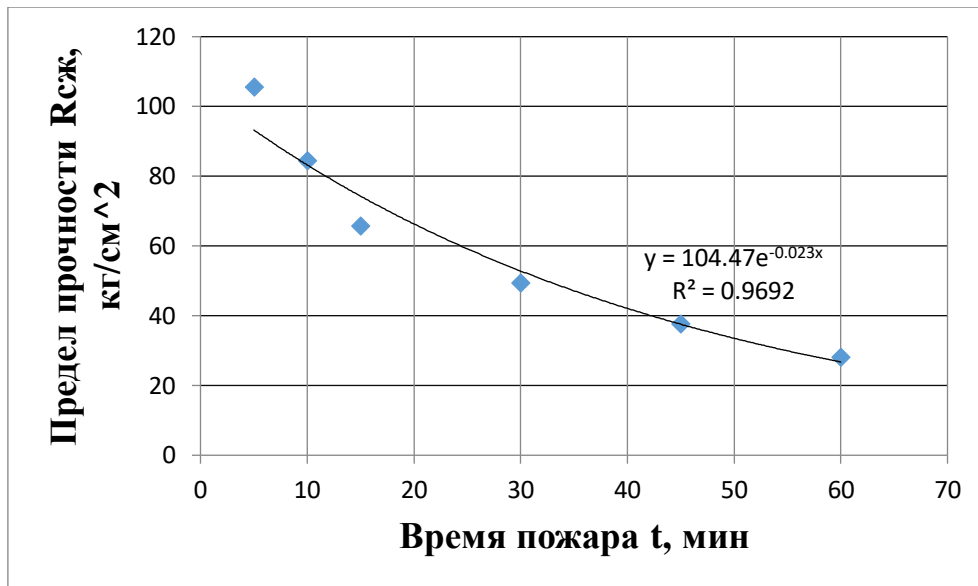


Рисунок 33 - График зависимости предела прочности R_{сж} от времени пожара t

Полученная эмпирическая формула $y = 104,47e^{-0,023x}$, является решением дифференциального уравнения 26 при

$$R(t) = R_0 \cdot e^{-kt}. \quad (30)$$

Которое означает, что снижение dR прочности за некоторое dt пропорционально прочности древесины, применяемой в строительстве. Коэффициент k является постоянной величиной и имеет размерность $[time^{-1}]$, $k_{сж} = 0.023$, коэффициент R_0 – начальная прочность древесины, не поддающаяся огневому воздействию, т.е. \rightarrow при $t = 0$. Знак минус (-) в правой части означает снижение прочности.

Кривые, которые показывают изменение предела прочности $u_{изг} = 233,06e^{-0,031x}$, $y = 104,47e^{-0,023x}$ являются решением дифференциального уравнения 6, где $k_{изг}$ и $k_{сж}$ - постоянные величины при изгибе и сжатии и составляют величины $k_{изг} = 0,031$, $k_{сж} = 0,023$.

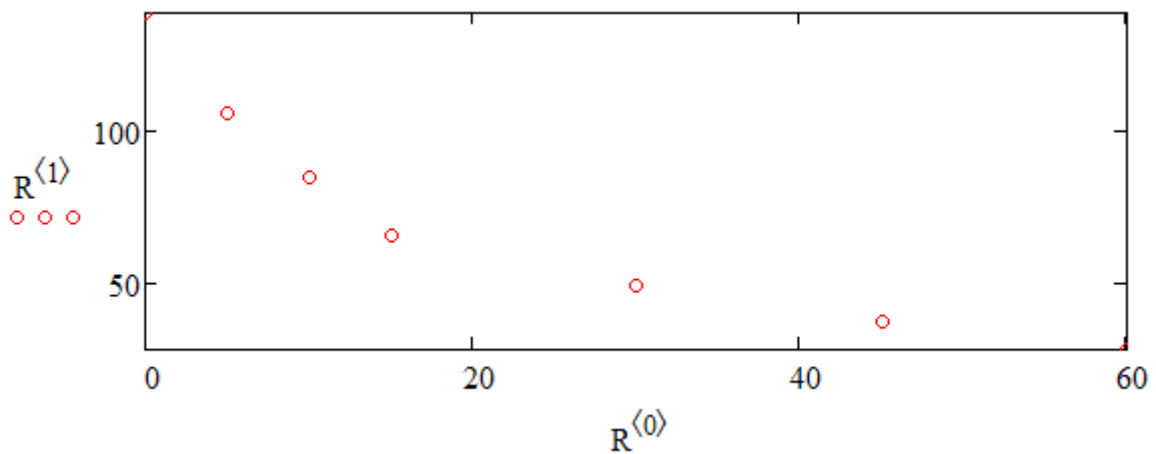


Рисунок 34 -График изменения предела прочности при сжатии

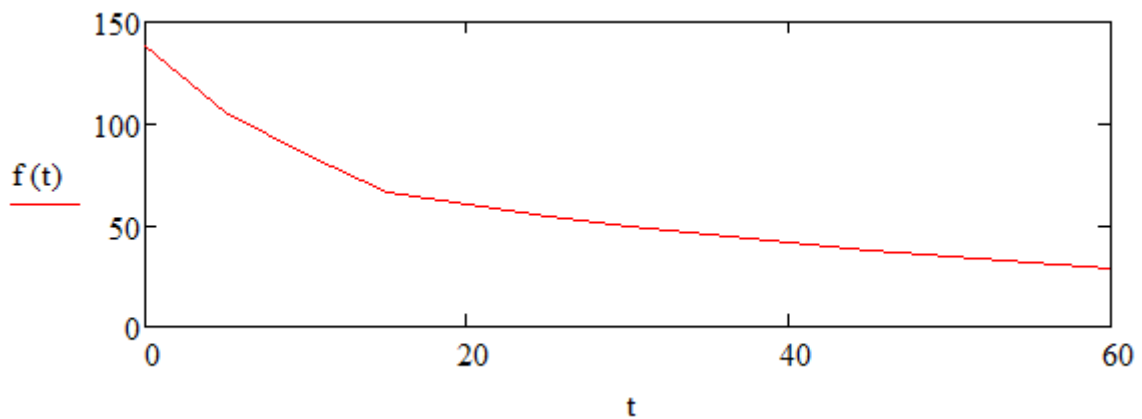


Рисунок 35 - Кривая изменения предела прочности при изгибе

Таким образом, зная предел прочности образца, который не поддавался огневому воздействию, по выведенным формулам можно определить предел прочности в любой момент времени стандартного температурного режима пожара.

$$T_{R/n} = \frac{\ln n}{k}. \quad (31)$$

где, n – величина изменения предела прочности в количество раз;

$T_{R/n}$ - время воздействия стандартного пожара.

6 ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Известно, что массивные пространственные деревянные конструкции могут обладать достаточно высоким пределом огнестойкости. Большую опасность представляют сетчатые деревянные конструкции, поэтому исследователями рассмотрена огнестойкость перекрестно-клееной панели перекрытия – конструкции, сочетающей в себе небольшой вес и высокую несущую способность, повышенную огнестойкость и звукоизоляцию, в сравнении с традиционными деревянными плитами перекрытия.

Конструкция плиты позволяет решить сразу несколько задач, встающих перед проектировщиками при принятии конструктивных решений. С точки зрения конструкции, данная плита является примером легкой и не материалоемкой панели с высокой несущей способностью, нагрузка равномерно распределяется в двух направлениях, что позволяет снизить напряжение в каждом отдельном ребре. Шаг ребер плиты (600 мм) существенно повышает огнестойкость конструкции, так как не позволяет пламени, в случае возникновения пожара, распространяться в горизонтальном направлении (от ребра к ребру), а использование вспучивающегося клея остановит распространение огня по вертикали и приведет к экранированию деревянных конструкций от источников тепла. Плита не привязана к типоразмерам по горизонтали, а высоту сечения клееных ребер можно увеличивать при необходимости перекрытия больших пролетов, что делает данную конструкцию легкой и удобной в применении в качестве перекрытия для широкого круга зданий и сооружений.

Ячейки, образованные плитой, могут выполнять одну или сразу несколько функций: в них можно располагать шумоизоляционные конструкции и системы пожаротушения, что жизненно необходимо в жилищном строительстве.

Свойства клееных плит с ортогональными несущими элементами в данное время малоизучены, это связано с отсутствием методики расчета клееных

соединений с учетом действия, оказываемого клеем на конструкцию и ее несущую способность. Помимо этого, плита является структурной конструкцией из пластинчатых элементов, методы расчета таких конструкций пока разработаны не в полной мере, в сравнении, например, со стержневыми решетчатыми конструкциями, так как пластинчатые конструкции пока не нашли повсеместного массового применения в строительной практике.

Пределы огнестойкости большинства металлических конструкций довольно невысоки из-за большого значения теплопроводности металла и высокой скорости распространения тепла внутри конструкции. При пожаре конструкции быстро достигают критических температур, при которых снижается несущая способность. Деревянные же конструкции лишены этого недостатка, однако, являются горючими, но принятые конструктивные решения в области защиты плиты от огня в разы повышают ее огнестойкость и позволяют конкурировать в этом поле с металлическими конструкциями.

Конструирование плиты производится с учетом прочностных характеристик используемых материалов несущих элементов и элементов обшивки, а также с учетом конструктивных особенностей применяемых листовых и пиломатериалов.

Для примера приведен расчет конкретной плиты. Шаг продольных ребер определяется из следующих условий:

1) условия предельного относительного прогиба верхней обшивки при изгибе от постоянной и временной нагрузок (конструктивные требования) согласно приложения Д.2 СП 20.13330.2016 [37]:

$$a = 0,6 \cdot \delta_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{\text{ф.и.,90}^\circ}}{q_{\text{п}}^{\text{н}} + q_{\text{в}}^{\text{н}}}}, \quad (32)$$

где $E_{\text{ф.и.,90}^\circ} = 5500$ МПа – модуль упругости фанеры обшивки поперек волокон листового материала;

$\delta_1 = 0,015$ м – толщина фанерной обшивки;

$q_n^H = 1,66$ кН/м² – постоянная нормативная нагрузка на верхнюю обшивку, согласно собранным нагрузкам;

$q_B^H = 1,5$ кН/м² – временная нормативная нагрузка на верхнюю обшивку, согласно собранным нагрузкам;

a – шаг ребер конструируемой конструкции.

2) из условия перемещений в пластинчатых элементах согласно дифференциальному уравнению поперечного изгиба пластины Софи-Жармен:

$$D \left(\frac{\sigma^4 w}{\sigma x^4} + 2 \frac{\sigma^4 w}{\sigma x^2 \sigma y^2} + \frac{\sigma^4 w}{\sigma y^4} \right) = q(x, y), \quad (33)$$

определяется перемещение согласно следующему уравнению:

$$a^3 = \frac{E_{\text{ф.и.,90}^\circ} \delta^3}{120 k_1 q_n}, \quad (34)$$

где $E_{\text{ф.и.,90}^\circ} = 5500$ МПа – модуль упругости фанеры обшивки поперек волокон листового материала;

$\delta = 0,015$ м – толщина фанерной обшивки;

$q_n = 3,16$ кН/м² – полная нормативная нагрузка на верхнюю обшивку, согласно собранным нагрузкам;

$k_1 = 0,0673$ – коэффициент подобия, учитывающий способ опирания пластины;

120 – коэффициент вертикально предельного прогиба согласно п.2 таблицы Д.1 приложения Д СП20.13330.2016 [37];

a – шаг ребер конструируемой конструкции.

Рассмотрим статический расчет плиты перекрытия в ПК SCAD, задав ребра плиты объемными элементами для учета анизотропных свойств деревянного каркаса, как показано на рисунках 36 и 37.

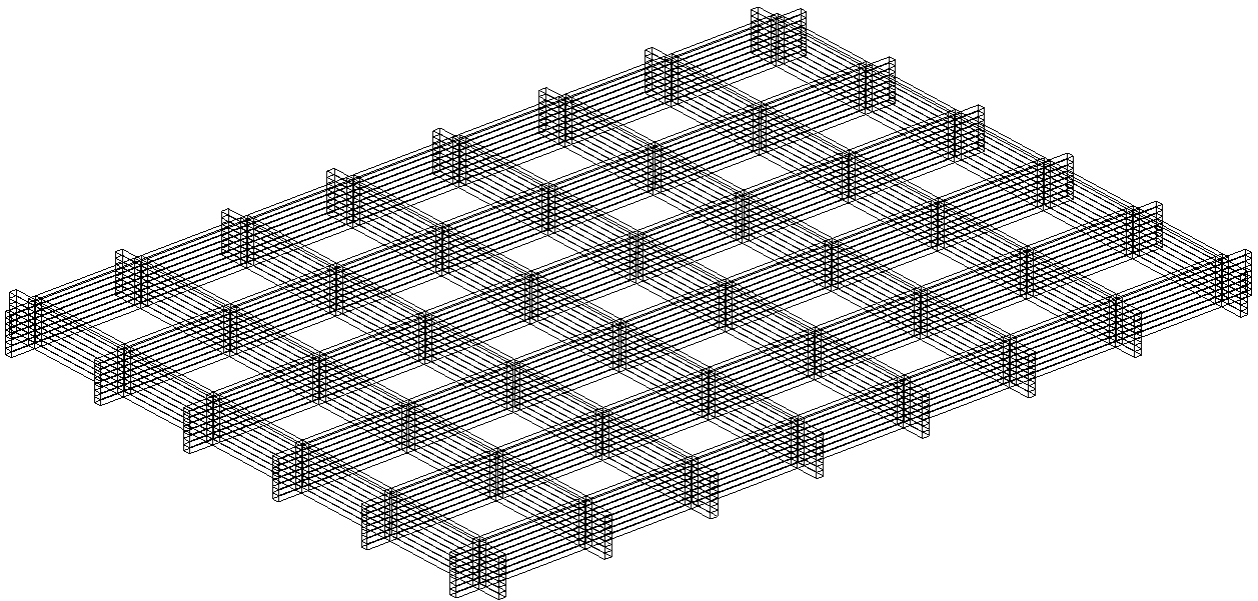


Рисунок 36 -Расчетная схема плиты перекрытия, заданная объемными телами

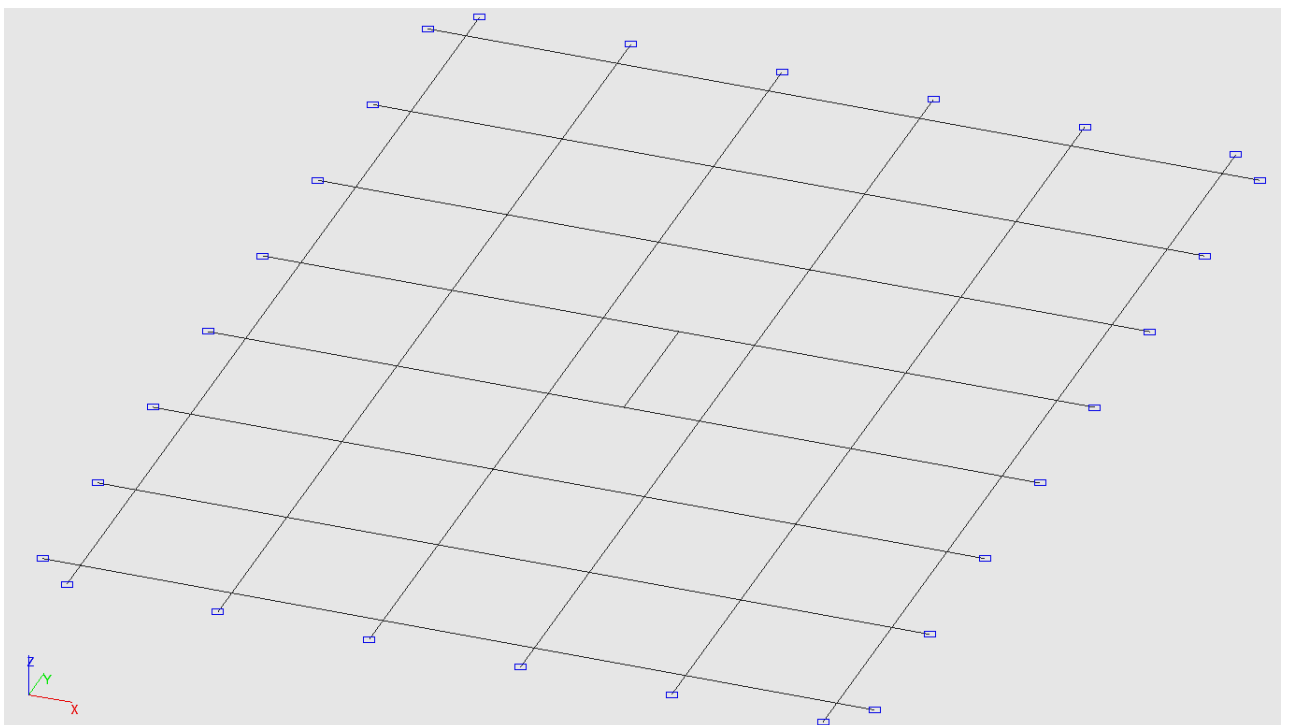


Рисунок 37 – Расчетная схема плиты перекрытия, заданная объемными телами

Плиту принимаем шарнирно опертой по четырем сторонам. Показатели ортотропии объемных элементов представлены на рисунке 38.

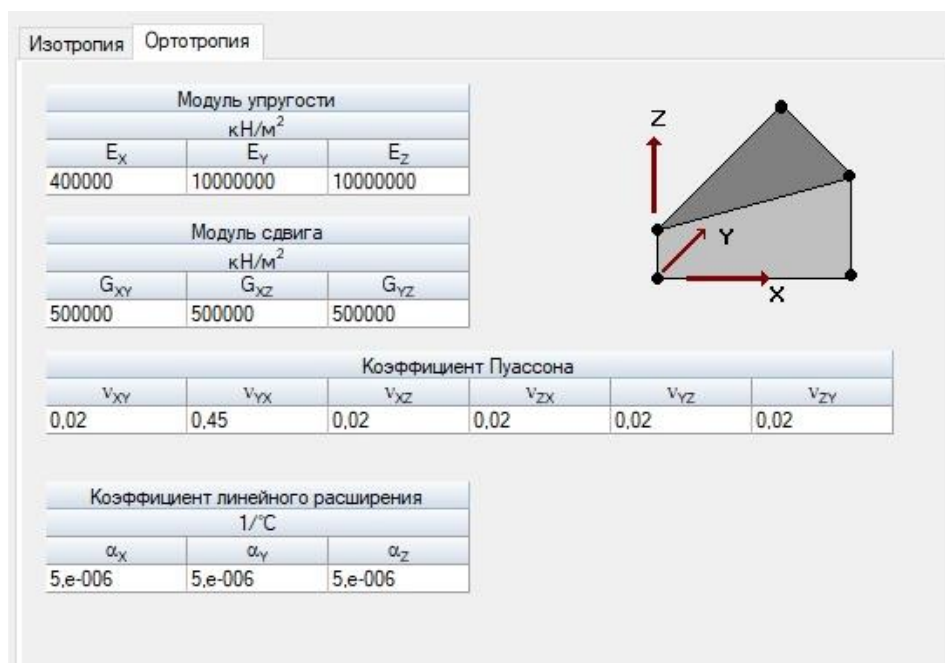


Рисунок 38 - Показатели ортотропии объемного элемента

Характеристики проектируемой плиты:

- объемный вес 4,9 кН/м³,
- модуль упругости 104 МПа,
- коэффициент Пуассона 0,45.

Схемазагружений на перекрестно-стержневую клееную деревянную плиту перекрытия в программном комплексе SCAD используется в виде объемных элементов. Деформационная схема представлена рисунке 39.

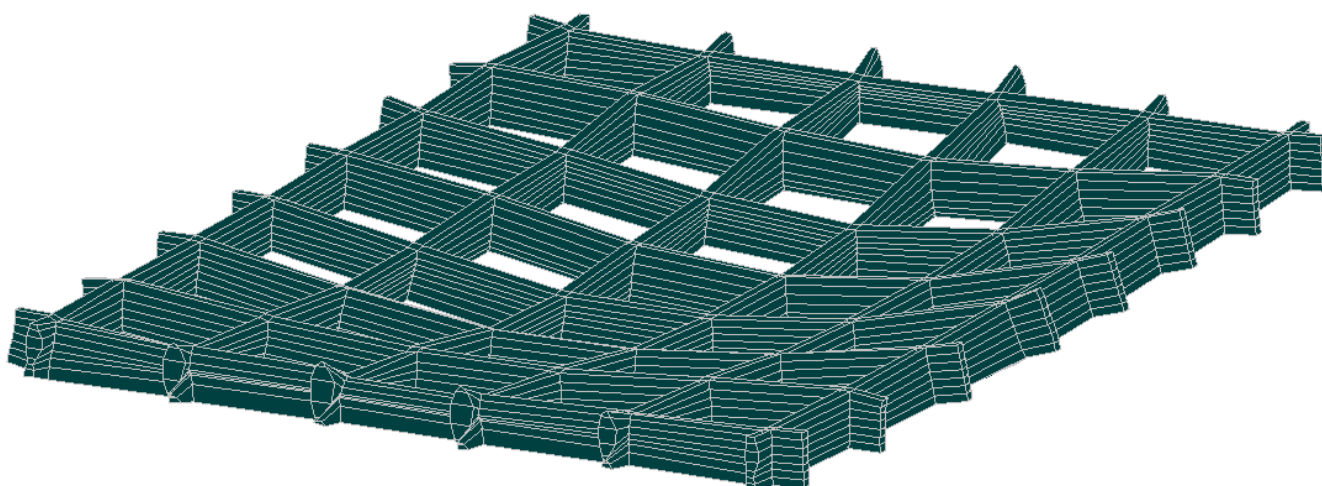


Рисунок 39 - Деформационная схема

Значения суммарных перемещений относительно оси Z для расчетной схемы, заданной в виде объемных тел приведены на рисунке 40. Для расчетной схемы, заданной в виде стержневых элементов значения суммарных перемещений относительно оси Z представлены на рисунке 41.

| Z | | мм | мм |
|---|--------|--------|-----|
| ✓ | -12.67 | -11.6 | 68 |
| ✓ | -11.6 | -10.53 | 123 |
| ✓ | -10.53 | -9.47 | 175 |
| ✓ | -9.47 | -8.4 | 175 |
| ✓ | -8.4 | -7.34 | 202 |
| ✓ | -7.34 | -6.27 | 230 |
| ✓ | -6.27 | -5.2 | 307 |
| ✓ | -5.2 | -4.14 | 264 |
| ✓ | -4.14 | -3.07 | 274 |
| ✓ | -3.07 | -2.01 | 260 |
| ✓ | -2.01 | -0.94 | 272 |
| ✓ | -0.94 | 0.13 | 607 |
| ✓ | 0.13 | 1.19 | 540 |
| ✓ | 1.19 | 2.26 | 165 |
| ✓ | 2.26 | 3.32 | 50 |
| ✓ | 3.32 | 4.39 | 9 |

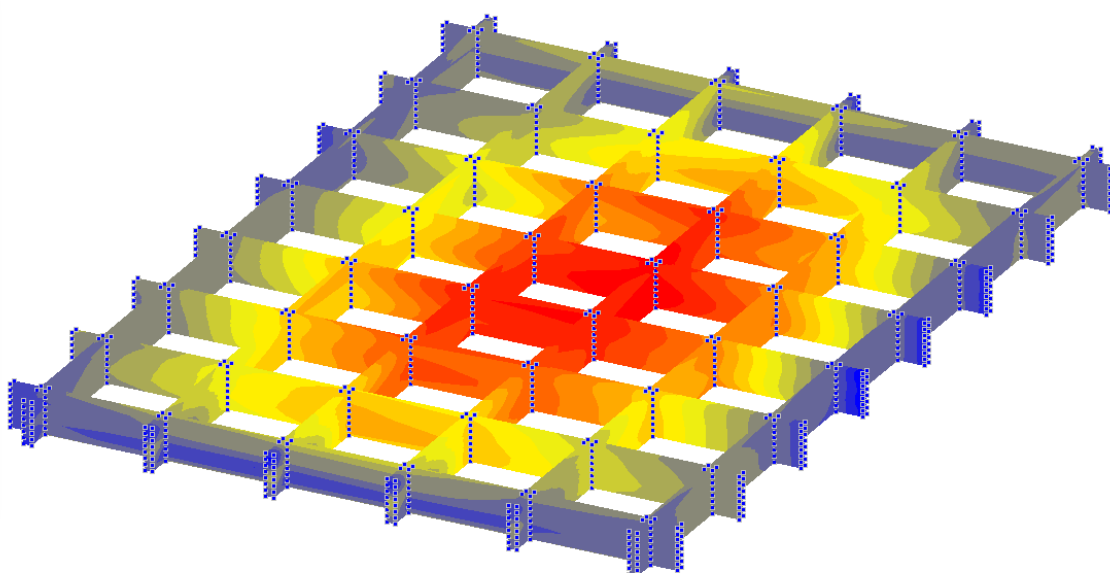


Рисунок 40 -Суммарное перемещение плиты перекрытия по оси Z

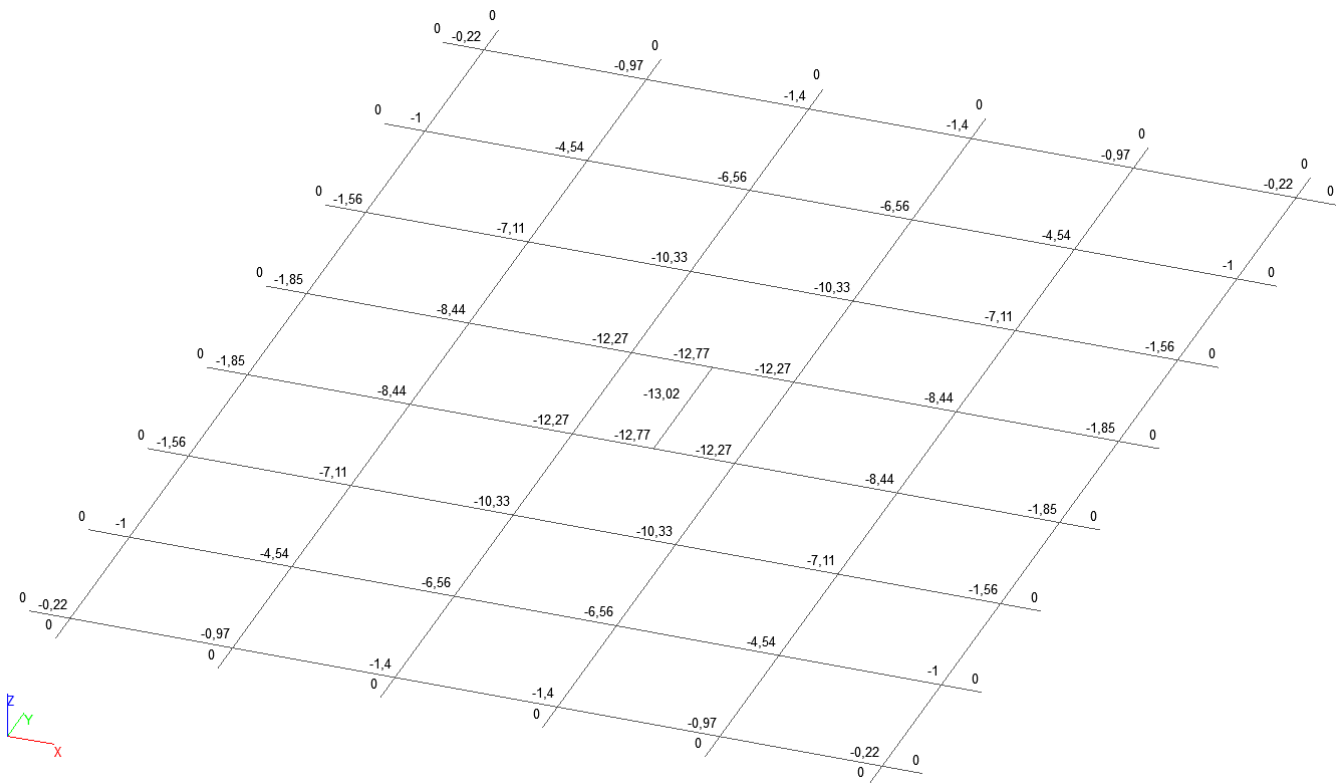


Рисунок 41 -Суммарное перемещение плиты перекрытия по оси Z

Максимальные значения перемещений при задании расчетной схемы в виде объемных тел составляет 12,67 мм, при задании в виде стержневых элементов составляет 13,02 мм. Таким образом, разница между различными способами задания расчетной схемы составляет:

$$\Delta_{пер} = \frac{z_{max} - z_{min}}{z_{max}} \cdot 100\% = \frac{13,02 - 12,67}{13,02} \cdot 100\% = 2,68\%$$

Погрешность составляет 2,68%, что меньше 5% и находится в пределах норм.

Расчет на прочность

1) Расчет изгибаемых элементов, обеспеченных от потери устойчивости плоской формы деформирования, на прочность по нормальным напряжениям следует выполнять по формуле:

$$\frac{M}{W_{\text{расч}}} \leq R_{\text{и}}, \quad (35)$$

где M – расчётный изгибающий момент, принимаемый согласно данным, представленным на рис. 42

$R_{\text{и}}$ – расчетное сопротивление изгибу;

$W_{\text{расч}}$ – расчётный момент сопротивления поперечного сечения элемента.

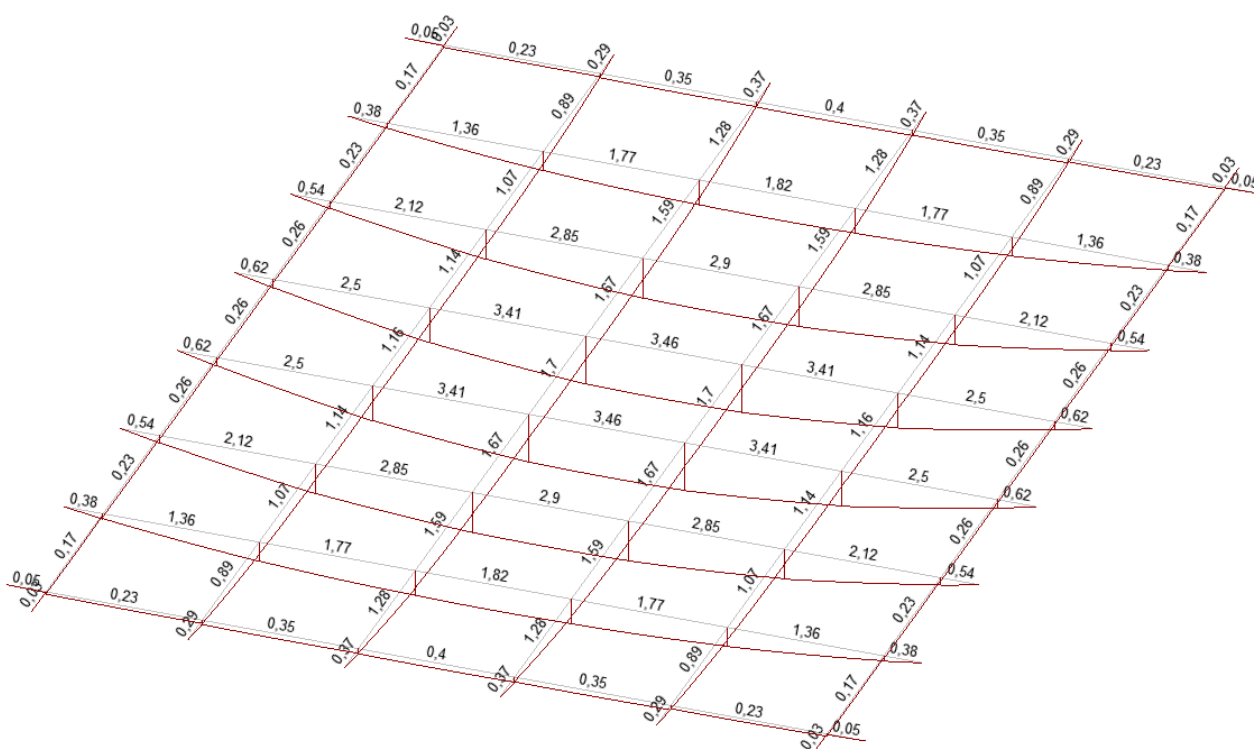


Рисунок 42 -Значение расчетных изгибающих моментов

Расчетные сопротивления древесины сосны, отсортированной по сортам, следует определять по формуле:

$$R^P = R^A \cdot m_{дл} \cdot P_{mi}, \quad (36)$$

где R^A – расчетное сопротивление древесины, МПа, согласно СП64.13330.2017 [20, табл. 3], влажностью 12% для режима нагружения Г, [4, табл. 4];

$m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки, СП64.13330.2017,[20, табл. 4];

P_{mi} – произведение коэффициентов условий работы.

При определении расчетного сопротивления в соответствующих случаях следует применять коэффициенты условий работы:

а) для различных условий эксплуатации конструкций – коэффициент m_b , СП64.13330.2017,[20, табл. 9];

б) конструкций, эксплуатируемых при установившейся температуре воздуха ниже плюс 35°C, - коэффициент $m_t = 1$; при температуре плюс 50°C – коэффициент $m_t = 0,8$. Для промежуточных значений температуры коэффициент принимают по интерполяции;

в) изгибаемых, внецентренно сжатых, сжато-изгибаемых и сжатых клееных деревянных элементов, в зависимости от толщины слоев, значения расчетных сопротивлений изгибу, скалыванию и сжатию вдоль волокон – коэффициент $m_{сд}$, СП64.13330.2017,[20, табл. 11];

г) в зависимости от срока службы – коэффициент $m_{с.с.}$, СП64.13330.2017,[20, табл. 13].

$$P_{mi} = m_b \cdot m_t \cdot m_{сд} \cdot m_{гн} \cdot m_{с.с.} \quad (37)$$

$$P_{mi} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,0.$$

Тогда, подставив значения в формулу (36), получим:

$$R^P = 19,5 \cdot 1 \cdot 1 = 19,5 \text{ МПа.}$$

Так как сечение ослаблено (рис. 43), расчёт производится по следующим формулам

$$W_{max} = \frac{I}{y}; \quad (38)$$

$$I = \left(\frac{bh^3}{12} + A \cdot a^2 \right) \cdot 2 + \left(\frac{bh^3}{12} + A \cdot (3a)^2 \right) \cdot 2; \quad (39)$$

$$I = \left(\frac{4 \cdot 3^3}{12} + 12 \cdot 3^2 \right) \cdot 2 + \left(\frac{4 \cdot 3^3}{12} + 12 \cdot (3 \cdot 3)^2 \right) \cdot 2 = 2196 \text{ см}^4;$$

$$W_{max} = \frac{2196}{10,5} = 209,1 \text{ см}^3;$$

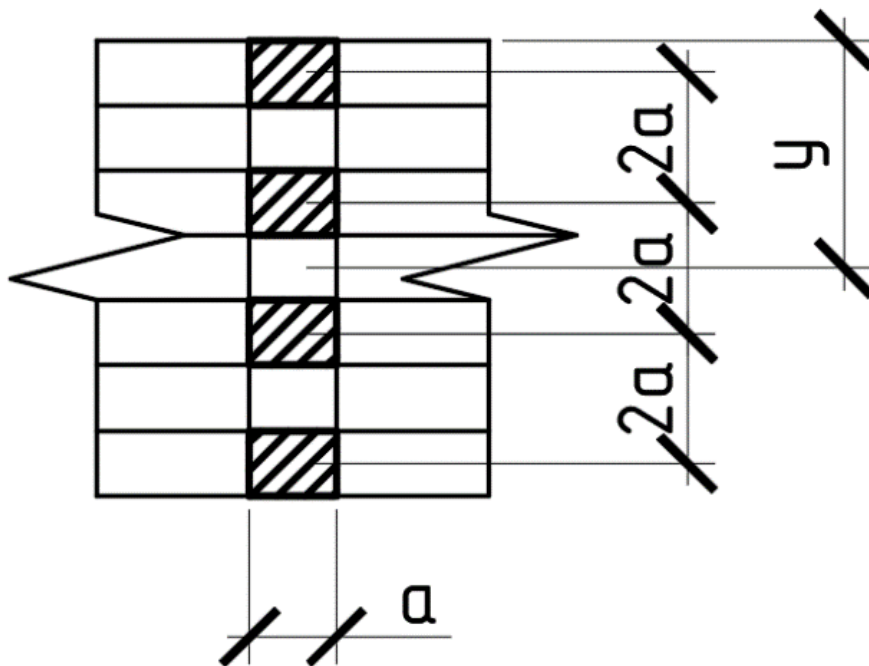


Рисунок 43 - Ослабленное сечение в продольном направлении

Максимальный момент ослабленного сечения принимаем, согласно рисунка 43, равным 3,46 кНм.

Полученные значения для сравнения подставляем в формулу (35):

$$M = 3,46 \text{ кНм} \leq R_{и} \cdot W_{\text{расч}} = 19,5 \cdot 10^6 \cdot 209,1 \cdot 10^{-6} = 4,08 \text{ кНм.}$$

Условие на прочность выполняется с запасом по прочности в 15,2%, что меньше 20%, соответственно, принятые конструктивные решения верны.

2) Определяющим критерием для данной плиты перекрытия также является расчет по второй группе предельных состояний – определение прогиба и сравнение его с допустимым.

Допустимый прогиб при пролете в 4,2 м определяется по следующей формуле

$$f_u = \frac{l}{170} = \frac{4200}{170} = 24,7 \text{ мм.} \quad (40)$$

Сопряжение стержней в узле панели устраивается без зазоров, в соответствии с рисунком 44.

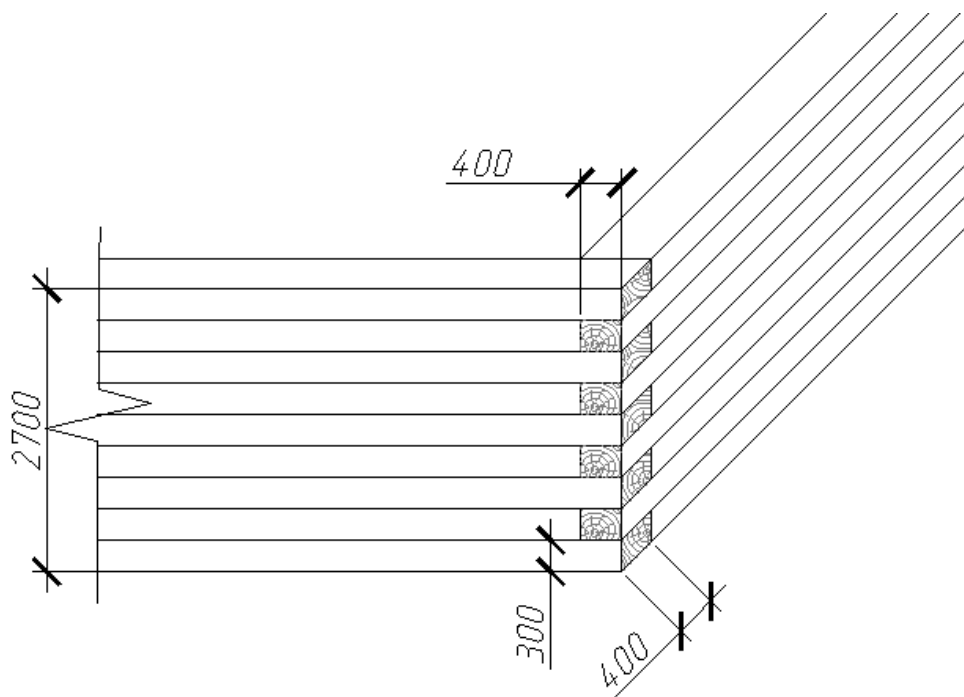


Рисунок 44 - Узел сопряжения ламелей

Пожарная опасность пространственных деревянных конструкций зависит от температуры воспламенения конкретной породы древесины или самовоспламенения измельченных древесных материалов, скорости выгорания и распространения пламени по поверхности, пространственной ориентации элементов конструкции, токсичности продуктов горения и пиролиза, огнестойкости конструкции. Имеют значение предельные параметры, характеризующие условия самоподдержания процесса горения, например, пожар происходит снаружи или внутри помещения.

Горение древесины представляет собой очень сложный физико-химический процесс, включающий как химические реакции деструкции, карбонизации в конденсированной фазе, а также химические реакции превращения и окисления газовых продуктов, так и физические процессы интенсивных тепло- и массопередачи. Реакции в конденсированной фазе фактически приводят к двум основным типам продуктов:

- 1) газообразным веществам (горючим и негорючим);
- 2) твердым продуктам (углеродсодержащим и минеральным).

При протекании реакции в газовой фазе в предпламенной области образуются топливо для пламени, сажа и прочее.

Специфической особенностью химии пламени является наличие сложного пространственного распределения температуры и концентраций исходных и промежуточных веществ и продуктов, а также для большинства древесины - наличие огромного числа разнообразных продуктов деструкции как в конденсированной, так и в газовой, предпламенной области. Все это чрезвычайно затрудняет экспериментальные исследования и создание строгих количественных теорий процессов горения древесины, которые бы учитывали все химические и другие особенности конкретных систем.

Процессы горения древесины делятся на обычное газовое и гетерогенное горение, или тление. В первом случае большая часть тепла, ответственного за поддержание самостоятельного химического превращения, выделяется в газовой фазе при окислении газообразных продуктов деструкции древесины. При этом область максимальной скорости выделения тепла (газовое пламя) обычно отстоит от поверхности на расстояние порядка миллиметров и более, в зависимости от конкретных условий горения. Поверхность древесины в таком случае оказывается значительно холоднее области газового пламени. Температуры поверхности составляют 400 - 650°C, а максимальные температуры в газовой фазе достигают 1100 - 1200°C и более. При тлении же все тепло выделяется, главным образом, в поверхностном слое конденсированной фазы, где и наблюдаются максимальные температуры (800 - 900 °C).

При горении древесины окислителем является кислород воздуха, а горючим - водород и углеродсодержащие газообразные продукты деструкции древесины, которые в результате окисления превращаются в воду и углекислый газ или, при неполном окислении, в угарный газ (CO). Потоки горючего и окислителя в этом случае пространственно разделены, и химическая реакция их взаимодействия обычно лимитируется подачей реагентов к пламени диффузией или конвекцией.

Газовое пламя носит тепловой характер, то есть его существование определяется наличием достаточно большого теплового эффекта при сгорании продуктов деструкции древесины и сильной температурной зависимостью скорости реакции окисления (большого значения эффективной энергии активации). При горении древесины наблюдаются критические явления, характерные вообще для процессов горения. Снижение температуры пламени по тем или иным причинам приводит к скачкообразному переходу от одного режима окисления - горения - к другому - очень медленному окислению. Эти режимы различаются между собой по скоростям на многие порядки.

Поэтому можно говорить о существовании критических условий, определяющих границы возможного горения данного материала. Следует отметить, что эти условия зависят от геометрии образцов и пламени, температуры древесины и газовой среды и не являются абсолютными характеристиками материала.

Одним из наиболее характерных примеров практического использования критических явлений при горении древесины являются методы снижения её горючести за счет применения специального клея.

Применение клеёных деревянных конструкции открывает еще один способ повышения огнестойкости деревянных конструкций - это введение в состав клея компонентов, способствующих образованию кокса при воздействии пламени на деревянную клеёную конструкцию. Первое важное следствие образования кокса - это снижение выхода горючих продуктов разложения древесины в газовую фазу, уменьшение потока горючих газов к зоне реакции горения. Образование коксовой шапки на поверхности деревянной конструкции между пламенем и следующей деревянной ламелью экранирует её от теплового потока, изменяет тепловой баланс поверхности древесины, снижая температуру. Это приводит к ограничению скорости пиролиза до величин, при которых реакция горения невозможна. Следовательно, образование кокса в слое клея, как показали

эксперименты (см. рис. 45), - важный процесс, существенно влияющий на механизм горения клеёной деревянной конструкции.

а)



б)



в)



Рисунок 45.- Состояние клеёной пространственной деревянной конструкции:
а) до испытаний, б) во время огневого воздействия, в) после 30 мин. огневого воздействия

Таким образом, еще один из способов снижения горючести клеёных деревянных конструкций - воздействие на направление деструкции полимера клея в сторону увеличения количества кокса.

Одним из наиболее эффективных ингибиторов процессов горения и тления древесины является фосфор и его соединения. Действие фосфорсодержащих антипиренов (замедлителей горения) обычно объясняют следующим образом. При пиролизе полимеров клея, содержащих соединения фосфора, происходит

образование фосфорной кислоты и ее ангидридов, которые катализируют дегидратацию и дегидрирование и способствуют процессу карбонизации. В последнее время применяют не только низкомолекулярные, но и полимерные фосфорсодержащие антипирены. Эти полимерные добавки имеют лучшую совместимость с основным полимером клея, меньше мигрируют из клея, отличаются более высокой стойкостью к различным внешним воздействиям и при относительно низком содержании фосфора являются эффективными антипиренами.

Другим немаловажным свойством клея является возможность введения в массив древесины микро капсулированных веществ, обладающих заранее заданными свойствами. Наиболее предпочтительными вариантами являются создание маркеров для особо нагруженных деревянных конструкций, а также маркеров для контроля протекающих биологических процессов.

Вместе с тем, применяемые в производстве клееных деревянных конструкций, покрытий и элементов зданий и сооружений клеи, адгезионные характеристики которых улучшаются за счет добавления синтетических смол, выделяют в условиях пожара такие токсины, как формалин, изоцианат и другие. Например, формальдегид действует как серьезный аллерген и раздражитель, обладает мутагенными свойствами. Эти свойства необходимо учитывать при разработке новых клеев для древесины.

Таким образом, создание принципиально новых смарт клеев для древесины открывает дополнительные области применения деревянных конструкций в зданиях и сооружениях и будет способствовать созданию больше этажного и большепролетного строительства.

Склеиваемые элементы должны быть одинаковой структуры и иметь одинаковую влажность. Ориентировочно минимальная толщина склеиваемого элемента — 15 мм. Клей должен наноситься на чистую поверхность.

Наилучшее качество достигается, когда наклон годичных колец к поверхности находится в пределах 60-90 градусов (этим достигается лучшая стабильность формы). В элементах гнукотклеенной панели используются ламели только одного типа распиловки – тангентальной или радиальной.

После острожки пиломатериала, необходимо удалить из него все дефекты, которые не позволяют получить готовую ламель: сучки темные (гнилые и загнившие), сучки здоровые (выпадающие, кромочные, торцевые, групповые и разветвленные), синева, гниль, смолянистость и смоляные кармашки, прорость, обзолы, механические повреждения, трещины, червоточина.

Наличие пороков определяется сортностью: 1 сорт для растянутых элементов, для сжатых и изгибаемых - 2 сорт.

Условия склеивания должны соответствовать требованиям, установленным в нормативных документах и технической документации на клей.

Температура в помещении, где производится склеивание, а также температура самих ламелей должна находиться в пределах 15-20°C. При более высокой температуре меняется «открытое время» клея, а также время начала полимеризации клея.

Помещение, где хранятся емкости с клеем и где производится перемешивание клея, должно быть отделено от остальных производственных помещений, чтобы избежать попадания в клей посторонних предметов, стружки, опилок и т.д. Клей должен храниться в закрытых емкостях и при температуре не ниже 5°C.

Склеивание должно производиться не позднее 24 часов после строгания. Для сортов древесины с повышенным влагосодержанием, это время должно быть минимальным. Шероховатость поверхности для склейки должна быть не ниже 5 класса шероховатости.

При использовании клея должны строго соблюдаться все указания изготовителя, особенно касающиеся времени прессования и силы прижима. Пресс

должен иметь возможность регулирования силы прижима, т.к. последняя должна соответствовать сорту древесины.

В целях выравнивания внутренних напряжений и разницы по влажности, склеенная конструкция должна обрабатываться не ранее, чем после 2-3 дней кондиционирования в помещении с нормальными условиями. После технологической выдержки склеенных по длине слоев, контролируются дефекты формы панели: крыловатость, продольную и поперечную покоробленность.

Предельные радиусы гнутья заготовок зависят от способа распиловки, породы древесины, толщины заготовок, температуры обработки. Примерная толщина ламелей в гнutoкклееных элементах составляет от 1/300 до 1/150 радиуса гнутья. После снятия нагрузки фиксации конструкция обретает форму заданного профиля, отличную от формы заготовок до их склеивания в конструкцию на 2-4%.

После прессования контроль качества осуществляется визуально. В соединении «на шип» не допускается наличие щелей.

Для древесины хвойных пород усилие прижима должно быть 0,6-0,8 Н/мм². Для равномерного распределения усилия прижима рекомендуется применять специальные прижимные устройства. Склеивание должно быть произведено по всей поверхности, т.е. наличие открытых швов недопустимо. Лучше допустить небольшой выход клея по всем швам. После склеивания, отклонение размера по толщине не должно превышать ± 0.5 мм. Отклонение от линейности — не более 1 мм/м.

При использовании мягких пород древесины давление прессования должно составлять 0,6 - 0,8 МПа для ламелей толщиной 33 мм, тогда как для ламелей толщиной 45 мм требуется давление 0,8 - 1,0 МПа. Чем больше толщина ламелей, тем более высокое давление прессования потребуется. Твердые породы требуют не менее 1,0 МПа. Для других типов склеивания требуемое время прессования составляет: минимально 0,5 МПа для мягких пород и минимально 1,0 МПа для

твердых пород. Слишком высокое давление может способствовать выдавливанию клея, в результате может произойти голодное склеивание. Недостаточное давление может вызвать слабый контакт между двумя субстратами, в результате чего может иметь место слабая прочность склеивания. Рекомендуемое давление для склеивания древесины 0,3-1,0 МПа.



Рисунок 46- Механические испытания пространственной сетчатой деревянной конструкции.

При нормальных условиях, пространственная сетчатая деревянная конструкция обладает высокой механической прочностью и выдерживает нагрузку не менее 400 кг/м^2 (см. рис .46)

Разрушение происходит по узлам элементов опорной зоны. Вследствие чего, нагрузка распределяется по пролётам, где происходит полное разрушение сечений элементов конструкции панели (см. рис.47).



Рисунок47- Разрушение в пролёте

Для получения объективных пожарно-технических характеристик пространственной сетчатой деревянной конструкции проведены натурные огневые испытания по ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» [15]. Сущность огневых испытаний заключается в определении времени от начала теплового воздействия на конструкцию, в соответствии с настоящим стандартом до наступления одного или последовательно нескольких предельных состояний по огнестойкости с учетом функционального назначения конструкции. Различают следующие основные виды предельных состояний строительных конструкций по огнестойкости: потеря несущей способности вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций (R); потеря целостности, в результате образования в конструкциях сквозных трещин или отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя (E); потеря теплоизолирующей способности, вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных для данной конструкции значений (I).



Рисунок48 - Огневые испытания пространственной сетчатой деревянной конструкции

По результатам испытаний пространственная сетчатая деревянная панель имеет предел огнестойкости не ниже REI 30. Таким образом, применение в зданиях и сооружениях пространственных деревянных конструкций позволяет иметь достаточный запас времени (не менее 30 минут) для эвакуации людей.

В результате проведенного исследования возможно предположить, что пожары - это один из основных факторов ограничения применения древесины в качестве строительного материала. Однако применение приемов конструктивной пожарной безопасности позволяет найти приемлемые результаты. Как показали эксперименты, скорость обугливания цельной древесины является величиной непостоянной, так как обугленный слой препятствует огневому воздействию. В результате «стандартного пожара» обугленный слой увеличивается, соответственно сечение без огневого воздействия уменьшается, также уменьшается скорость обугливания древесины.

Также, на основе проведенных экспериментов можно сделать вывод, что предел прочности древесины уменьшается с течением времени пожара по определенному закону дифференциального уравнения:

$$\frac{dR}{dt} = -k \cdot R; \quad (41)$$

Кривые, которые показывают изменение предела прочности $u_{изг} = 233,06e^{-0,031x}$, $y = 104,47e^{-0,023x}$ являются решением дифференциального уравнения.

$$R(t) = R_0 \cdot e^{-kt} \quad (42)$$

$k_{изг}$ и $k_{сж}$ - постоянные величины при изгибе и сжатии;

$$k_{изг} = 0,031, k_{сж} = 0,023.$$

Таким образом, зная предел прочности образца, который не поддавался огневому воздействию, по выведенным формулам можно определить предел прочности в любой момент времени стандартного температурного режима пожара.

$$T_{R/n} = \frac{\ln n}{k}. \quad (43)$$

n – величина изменения предела прочности в количество раз;

$T_{R/n}$ - время воздействия стандартного пожара;

На основе коэффициентов $k_{изг}$ и $k_{сж}$ можно определить предел прочности в любой момент времени «стандартного» температурного режима пожара.

Новые выведенные формулы и коэффициенты можно использовать при проектировании деревянных конструкций для повышения предела огнестойкости строительных конструкций.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните стадии горения древесины.
2. Теплофизические свойства, влияющие на горение древесины.
3. Основные условия, необходимые для горения древесины.
4. Общие закономерности поведения древесины в условиях пожара.
5. Нормативные требования в области пожарной безопасности деревянных зданий.
6. Нормативная база по строительству деревянных зданий в Северной Европе.
7. Общие принципы расчета огнестойкости строительных конструкций.
8. Основные преимущества деревянного домостроения.
9. Способы стыковки деревянных конструктивных элементов.
10. Повышение огнестойкости соединений деревянных элементов.
11. Основные условия надежности используемых соединений деревянных конструкций.
12. Технологические приемы и материалы снижения горючести древесины.
13. Снижение горючести древесины теплоизолирующими одеждами.
14. Снижение горючести древесины огнезащитными обмазками и штукатурками.
15. Снижение горючести древесины огнезащитными лакокрасочными материалами.
16. Снижение горючести древесины огнезащитными пропитками.
17. Огнезащита промышленных изделий из древесины.
18. Свойства клееных плит с ортогональными несущими элементами.
19. Пожарная опасность пространственных деревянных конструкций.
20. Применение клеёных деревянных конструкций.
21. Особенности проектирования деревянных конструкций для повышения предела огнестойкости зданий.
22. Определение пределов огнестойкости композитных деревянных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. Ю., Андреев Ю. А., Амельчугов С. П., Груманс В. М. Оценка лесопожарного риска и управление им // Пожарная безопасность. - 2015. - №2. - С. 128-134.
2. Амельчугов С.П., Болодьян И.А., Боков Г.В. и др. Обеспечение пожарной безопасности на территории Российской федерации. - М.: ВНИИПО, 2006. - 462 с.
3. Шубкин Роман Геннадьевич. Анализ многовековой хронологии лесных пожаров и вероятностный прогноз их возникновения в Байкальском регионе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.13.01- Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям). - Иркутск, 2007. - 133 с. : ил.
4. Gusnadóttir I. Timber as Load Bearing Material in Multi-storey Apartment Buildings: A Case Study Comparing the Fire Risk in a Building of Non-Combustible Frame and a Timber-Frame Building. – Reykjavik: Faculty of Civil and Environmental Engineering School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland, 2011
5. Гилетич А.Н., Хасанов И.Р., Макеев А.А. Пожарная безопасность многоэтажных зданий из деревянных конструкций// Пожарная безопасность. - 2014. - № 2. - С. 116-125.
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. - М.: ВНИИПО, 2012. - 148 с.
7. СП 2.13130.2012. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. - М.: ВНИИПО, 2012. - 43 с.
8. СП 54.13330.2011. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. - М.: Минрегион, 2011. - 40 с.
9. Fontana M., Frangi A. Fire safety of multistory timber buildings. // Structures & Buildings, 2010. vol. 163, no. 4, pp. 213–226. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.4.213.

10. Östman B., Rydholm D. National fire regulations in relation to the use of wood in European and some other countries. Träteknik: Swedish Institute for Wood Technology Research, 2006.
11. Баратов А.И., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное издание. Кн. 1. - М.: Химия, 1990. - 496 с.
12. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С., Шевляков А.Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. - М.: Стройиздат, 1986. - 370 с.
13. ГОСТ 30403-2012 Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность. - М.: Стандартинформ, 2014. - 10 с.
14. ISO 834-1:1999. Fire resistance tests - Elements of building constructions. Part 1: General requirements. ISO, 1999.
15. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. - М.: ГУП ФЦП Госстрой, 1998. - 17 с.
16. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. - М.: Ассоциация «Пожнаука», 2001. - 385 с.
17. Литвинцев К.Ю., Амельчугов С.П., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Негин В.А., Харламов Е.Б. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2010613073. «Программный комплекс для численного моделирования динамики пожаров (σ Fire)», регистр. 11 мая 2010 г.
18. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю., Амельчугов С.П., Серегин С.Н. Моделирование динамики пожаров в спортивных сооружениях // Пожарная безопасность. - 2007. - №4. - С. 49-58.
19. Амельчугов С.П., Клочков С.В. Новые информационные технологии в пожарной безопасности // Пожарная безопасность. - 2015. - №3. - С.144-151.
20. СП64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП III-25-80. - М.: Минрегион, 2011. - 88 с.

21. EN 1995-1-1. Eurocode 5 – Design of timber structures, Part 1-2. General – Structural fire design. CEN, Brussels, 2004
22. ГОСТР 56711-2015
Соединения нагельного типа для деревянных конструкций - Москва, 2016
23. ГОСТ 16483.0-89 Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. - ИПК издательство стандартов, 1999
24. UKTFA, Engineered wood products and an introduction to timber structural systems (The Structural Engineer, 2013)
25. Инжутов И.С., Жаданов В.И., Украинченко Д.А., Рожков А.Ф., Афанасьев В.Е. Методологические основы поиска рациональных решений деревянных панельных конструкций: учебное пособие. - Оренбург-Красноярск: ООО ИПК «Университет», 2016. - 295 с.
26. Зенков Н.И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара. - М, ВИПТШ, 1974, - С. 118-131.
27. Шейкин А.Е. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1978. -С. 233-267.
28. Комар А.Г. Строительные материалы и изделия. – М.: ВШ, 1976 - С.382-402.
29. ГОСТ 23790-79 Покрытие по древесине фосфатное огнезащитное. Технические требования (Постановление Государственного комитета СССР по делам строительства от 27 июля 1979 г. № 128. Срок введения установлен с 01.01.1980 г.)
30. ГОСТ 4028—63 Гвозди строительные. Конструкция и размеры (Государственный комитет стандартов, мер и измерительных приборов СССР от 06.08.63 № 567).
31. ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»

32. ГОСТ 21554.3-82 «Пиломатериалы и заготовки. Метод контроля прочности при изгибе, растяжении и сжатии»
33. ГОСТ 24454-80 «Пиломатериалы хвойных пород. Размеры»
34. Справочник современного архитектора: Справочник/ под общ. ред. Маилян Л.Р. – Рн/Д: Феникс, 2010. - 632 с.
35. Федоров, А.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций / А.С. Федоров, В.Е. Леватский, И.С. Молгадский и др. — М.: Издательство Ассоциации строительных Вузов, 2009. — 408 с.
36. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. - М.: Стройиздат, 1988. - 143 с.
37. Шубкин Р.Г. Метод дендрохронологии: Выявление крупномасштабных лесных пожаров и градаций хвоегрызущих насекомых/ Р.Г. Шубкин, В.А. Осолков, В.И. Воронин // Лесное хозяйство.- 2006.-№2.-С.45-47.
38. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*(Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. N 891/пр. Введен в действие с 4 июня 2017 г.)
39. ГОСТ Р 56695-2015 Возобновляемые источники сырья. Лесные ресурсы. Термины и определения

Горение древесины при пожаре

Учебное пособие

Авторы:

Амельчугов Сергей Петрович,

доктор технических наук

Шубкин Роман Геннадьевич,

кандидат технических наук

Антонов Александр Викторович

кандидат технических наук

Романов Сергей Вячеславович

кандидат технических наук

Никулин Михаил Александрович

Размещается в сети Internet на сайте ГАУ Северного Зауралья
URL: <http://www.tsaa.ru/documents/publications/2022/amelchugov.pdf>,
в научной электронной библиотеке eLIBRARY, ИТАР-ТАСС, РГБ,
доступ свободный

Издательство электронного ресурса
Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО «ГАУ Северного Зауралья».
Заказ №1119 от 25.12.2022; авторская редакция
Почтовый адрес: 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Республики, 7.
Тел.: 8 (3452) 290-111, e-mail: rio2121@bk.ru

ISBN 978-5-98346-098-0



9 785983 460980