

УДК 614.849

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ СТРОЙМАТЕРИАЛОВ

Аксенов С.Г.

*д-р э.н., профессор,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Курамшин А.Р.

*студент,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема повышения пожарной безопасности строительных конструкций из древесины. Проанализированы физико-химические основы процесса горения древесины и методы его замедления: конструктивные решения, поверхностная обработка огнезащитными составами, глубокая пропитка антипиренами и модификация полимерных связующих. Особое внимание уделено современным антипиреновым системам, включая фосфорорганические соединения, интеркалированные графиты и наноразмерные добавки, повышающие эффективность огнезащиты. Приведены механизмы ингибирования горения (образование карбонизованного слоя, разложение с поглощением тепла, разбавление газовой фазы), а также результаты сравнительных испытаний различных способов обработки по критериям потери массы, кислородного индекса и дымообразования.

Ключевые слова: древесина, горючесть, огнезащита, антипирены, снижение горючести.

***ON THE QUESTION OF INCREASING FIRE SAFETY OF WOOD
BUILDING MATERIALS***

Aksyonov S.G.

*Doctor of Economics, Professor,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Kuramshin A.R.

*Student,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Abstract. This article examines the pressing issue of improving the fire safety of timber structures. It analyzes the physicochemical principles of wood combustion and methods for retardation, including design solutions, surface treatment with fire-retardant compounds, deep impregnation with flame retardants, and modification of polymer binders. Particular attention is paid to modern flame retardant systems, including organophosphorus compounds, intercalated graphites, and nanoscale additives that enhance fire protection effectiveness. The article presents combustion inhibition mechanisms (formation of a carbonized layer, decomposition with heat absorption, dilution of the gas phase), as well as the results of comparative tests of various treatment methods based on weight loss, oxygen index, and smoke formation.

Keywords: wood, flammability, fire protection, flame retardants, flammability reduction.

Древесина на протяжении тысячелетий остается одним из главных конструкционных материалов в строительстве благодаря уникальному

сочетанию механической прочности, низкой теплопроводности, эстетической привлекательности и возобновляемости. Однако органическая природа древесины обуславливает ее главный недостаток — способность к воспламенению и распространению пламени. В условиях современного строительства, где требования к пожарной безопасности ужесточаются с каждым годом, проблема снижения горючести древесных материалов становится критической. Под горючестью понимают способность материала воспламеняться, самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и распространять пламя по поверхности. Согласно ГОСТ 30244-94, древесина без обработки относится к группе сильногорючих материалов (Г4), что существенно ограничивает сферу ее применения в общественных, высотных и промышленных зданиях. Тем не менее, полный отказ от древесины нецелесообразен как с экономической, так и с экологической точки зрения. Поэтому задача инженеров и химиков — разработать эффективные методы перевода древесины в группу слабогорючих (Г1) или трудногорючих (Г2) материалов без ухудшения ее ценных свойств. Современные подходы к решению этой задачи включают три основных направления: конструкционная защита (облицовка негорючими листами, использование систем пассивной противопожарной защиты), поверхностная обработка огнезащитными составами (лаками, красками, обмазками) и глубокая модификация древесного композита на стадии пропитки под давлением или введения антипиренов в клеевые системы при производстве клееной древесины и древесно-стружечных плит. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и ограничения. Конструкционная защита надежна, но часто скрывает текстуру древесины и увеличивает массу конструкции. Поверхностные покрытия просты в нанесении, но их долговечность невелика, а при механических повреждениях огнезащитная способность резко падает. Глубокая пропитка антипиренами представляется наиболее радикальным и устойчивым методом, однако требует специального оборудования (автоклавов) и может приводить к

Дневник науки | www.dnevnika.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

снижению прочности при изгибе и увеличению гигроскопичности материала. В последние десятилетия интенсивно развиваются гибридные подходы, например, использование наноразмерных антипиренов, которые проникают в наноструктуру клеточных стенок древесины, обеспечивая огнезащиту без изменения внешнего вида и с минимальным влиянием на механические свойства.

Для понимания действия огнезащитных составов необходимо обратиться к физико-химическим основам горения древесины. Древесина состоит в основном из целлюлозы (40–50%), гемицеллюлоз (20–30%) и лигнина (20–30%). При нагреве до 250–300°C начинается термическое разложение этих полимеров. Целлюлоза деполимеризуется с образованием левоглюкозана, который затем разлагается до летучих горючих продуктов — оксида углерода, метана, формальдегида, уксусной кислоты, а также большого количества смолистых веществ. Гемицеллюлозы разлагаются при более низких температурах (200–250°C), выделяя значительное количество тепла. Лигнин наиболее термостоек и при разложении дает около 40% углеродистого остатка (карбонизованного слоя). Процесс горения древесины является гетерогенно-гомогенным: сначала под действием тепла из внешнего источника в поверхностном слое образуются газообразные продукты пиролиза, которые смешиваются с кислородом воздуха и воспламеняются, давая факел пламени. Тепло от факела дополнительно прогревает глубже лежащие слои, вызывая их разложение, и процесс становится самоподдерживающимся. Скорость этого процесса зависит от плотности древесины, влажности, пористости и наличия естественных смол. Ключевая идея снижения горючести — вмешаться в этот цикл на одном из этапов: предотвратить прогрев материала (теплоизолирующий экран), подавить образование горючих газов (катализ реакций карбонизации), разбавить газовую фазу негорючими продуктами (вода, аммиак, углекислый газ) или прервать цепные реакции радикалов в

пламени. Именно на этих принципах основано действие современных антипиренов. Классические неорганические антипирены, такие как бура, борная кислота, сульфат аммония, фосфаты натрия и аммония, работают преимущественно по механизму образования плавленного стеклообразного слоя. При нагревании они плавятся, создавая на поверхности древесины пленку, затрудняющую доступ кислорода и отвод летучих продуктов. Кроме того, при разложении многих солей аммония выделяется негорючий газ аммиак, который разбавляет горючие пары. Однако эффективность неорганических составов невысока: требуются большие расходы (15–20% от массы древесины), они легко вымываются водой, что делает их малопригодными для наружных конструкций. Значительно более эффективны фосфорорганические антипирены и азотсодержащие соединения (меламин, дициандиамид). Эти вещества действуют по механизму кислотного катализа дегидратации полимеров. При температуре 180–220°C фосфорная кислота, образующаяся при термоллизе фосфорорганического антипирена, реагирует с гидроксильными группами целлюлозы, катализируя реакцию внутримолекулярной дегидратации вместо деполимеризации. В результате вместо легколетучего левоглюкозана образуется вода и углеродсодержащий остаток (шлак). Вода испаряется, поглощая большое количество тепла и разбавляя газовую фазу, а оставшийся слой шлака состоит из полициклических ароматических структур, богатых фосфором. Этот слой не только защищает древесину от нагрева, но и сам является негорючим. Особенно эффективны смеси полифосфата аммония с пентаэритритом и меламином, известные как классические интумесцентные (вспучивающиеся) системы. При пожаре такая система образует толстый пористый коксовый слой, увеличивающийся в объеме в десятки раз, который служит превосходной теплоизоляцией. Современные исследования направлены на создание так называемых "интеллектуальных" антипиренов, которые активируются строго в условиях пожара и не влияют на древесину в обычных условиях [1,3].

Методы нанесения огнезащитных средств на древесину классифицируются по глубине проникновения и технологической сложности. Самый простой метод — поверхностное нанесение кистью, валиком или распылением. Он применяется для водных растворов антипиренов, органорастворимых лаков и вспучивающихся красок. Глубина пропитки при этом не превышает 1–3 мм, что достаточно для защиты малоответственных элементов (стропил, обрешетки) в сухих помещениях. Однако по стандарту EN 13501-1 такой способ позволяет повысить группу горючести максимум с Г4 до Г3 (умеренно горючие) или Г2 при использовании высокоэффективных составов и многослойном нанесении. Более надежна глубокая пропитка методом "горяче-холодных ванн" или под давлением в автоклавах. Древесину помещают в резервуар с антипиреном, создают вакуум для удаления воздуха из пор, затем подают давление до 10–15 атм, что заставляет раствор проникать на глубину до 10–20 мм и более, иногда насквозь для тонких пиломатериалов. Такой метод обеспечивает равномерное распределение антипирена по объему и делает огнезащиту нечувствительной к истиранию и увлажнению. Недостаток — необходимость в дорогом оборудовании и некоторое снижение прочности древесины (до 15% при использовании кислых составов). Для композитных материалов на основе древесины (ДСП, ОСП, клееный брус) применяется введение антипиренов непосредственно в связующее на стадии производства. Например, при изготовлении ОСП вместо стандартной фенолформальдегидной смолы используют модифицированную смолу с добавкой полифосфата аммония или гидроксида алюминия. Получаемая плита обладает группой горючести от Г1 до Г2 при сохранении прочности на изгиб на уровне 20–25 МПа. Отдельно стоит упомянуть химическую модификацию самой древесины, например, ацелирование. При обработке уксусным ангидридом гидроксильные группы в целлюлозе замещаются на ацетильные, что резко снижает гигроскопичность и, как следствие, повышает температуру воспламенения с 250 до 350°С, а также уменьшает теплоту сгорания почти

Дневник науки | www.dnevnika.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

вдвое. Однако из-за высокой стоимости такой метод применяется только для эксклюзивных объектов (концертные залы, музеи, дорогое частное строительство).

Нормативные требования к снижению горючести древесины в разных странах различаются, но имеют общую логику. В России действует Федеральный закон № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", согласно которому для строительных материалов древесина, применяемая в путях эвакуации, в зданиях детских, лечебных учреждений и в жилых домах выше 28 метров, должна иметь группу горючести не выше Г2 или Г1. Достижение Г1 (слабогорючие) означает, что потеря массы при испытании по ГОСТ 30244 не превышает 20%, температура дымовых газов не более 135°C, а распространение пламени по поверхности отсутствует. Для сертификации огнезащитного средства древесные образцы обрабатывают по стандартной методике, высушивают и подвергают испытанию в огневой трубе или на калориметре конусного типа. Критический параметр — "эффективность огнезащиты", выражаемая обычно в процентах снижения потери массы по сравнению с необработанной древесиной. Потери массы в 9% соответствует переход из Г4 в Г3, 30% — из Г4 в Г2, 60% — из Г4 в Г1. Практика показывает, что даже лучшие современные интумесцентные краски обеспечивают потерю массы не ниже 40–50% при слое 0,5 мм, тогда как автоклавная пропитка фосфатами аммония позволяет снизить потерю массы до 15–20%, что соответствует группе Г1. При этом важно помнить о старении огнезащиты. Для наружных конструкций нормативно требуется повторная обработка каждые 3–5 лет, для внутренних — каждые 7–10 лет, либо контроль методом проверки наличия антипирена с помощью индикаторных растворов (например, ферроцианида калия на фосфаты или хромазурина S на фосфорорганические соединения). В Европе и США также широко используется показатель "кислородный индекс" (LOI) — минимальная

объемная концентрация кислорода в смеси с азотом, при которой образец способен самостоятельно гореть. Древесина имеет LOI около 18–20%. Слабогорючие материалы (класс В по EN 13501) должны иметь LOI выше 28%. Обработка эффективными антипиренами повышает LOI до 30–35%, что делает древесину сравнимой по поведению при пожаре с некоторыми пластиками с низкой горючестью [4,5].

Разберем несколько конкретных примеров из практики огнезащиты древесины. Первый — использование боратов (бура + борная кислота) в соотношении 1:1. Это самый старый и экономичный способ, применяемый еще в Древнем Египте для пропитки деревянных корабельных элементов. Бораты нетоксичны, не вызывают коррозии металлических креплений, но, как уже говорилось, легко вымываются. Тем не менее, для внутренних конструкций каркасных домов в США и Канаде боратная обработка является стандартом. Современные коммерческие продукты на основе боратов, такие как "Буран-6", "Пирилакс", обеспечивают потерю массы на уровне 35–40% (группа Г2). Второй пример — фосфорорганические антипирены нового поколения, например, диметилметилфосфонат (ДММФ) или олигомерный фосфонат. Они представляют собой низковязкие жидкости, хорошо проникающие в древесину без давления, поскольку их молекулы имеют размер менее 1 нм. После пропитки и полимеризации (например, под воздействием тепла или катализатора) они образуют в порах древесины сшитые полимерные сетки, которые не вымываются водой и при пожаре превращаются в жесткий полифосфорный шлак с выходом кокса до 40%. Испытания сосны, пропитанной 10% раствором олигофосфоната, показали потерю массы всего 12% при испытании по ГОСТ 30244 и кислородный индекс 34%. Однако стоимость таких составов в 5–7 раз выше боратных. Третий пример — интумесцентные краски на водной основе, например "Неотерм" или "Файрекс". При толщине сухого слоя 1 мм они при нагреве вспучиваются в

слой кокса толщиной до 50 мм, который выдерживает температуру до 1200°C в течение 30–60 минут. Это позволяет использовать несущие деревянные балки без дополнительного бетонирования. Однако такие краски чувствительны к механическим воздействиям и требуют обязательного финишного покрытия лаком. Интересное направление — использование наноглин (монтмориллонита, органоглины) в составе антипиренов. При добавлении всего 3–5% органомодифицированной глины к полифосфату аммония значительно повышается вязкость расплава при горении, что препятствует стеканию горящих капель и улучшает формирование коксового слоя. Лабораторные образцы древесины, пропитанной суспензией наноглины с антипиреном, показали снижение максимальной скорости тепловыделения с 280 до 65 кВт/м², что является выдающимся результатом. Недостаток — пока не решена проблема агломерации наночастиц в промышленных масштабах [2,3].

Одним из важнейших аспектов снижения горючести является сохранение экологической чистоты и безопасности человека. Многие классические антипирены, такие как гексабромид циклопентадиена или тетрабромбисфенол А, в настоящее время запрещены в ЕС и США из-за токсичности продуктов горения (бромистый водород, диоксины, фураны). Древесина, обработанная такими составами, при пожаре выделяет чрезвычайно опасные вещества. Поэтому современные исследования фокусируются на биоразлагаемых и нетоксичных системах. Примером служат фитиновые кислоты (инозитолфосфаты), содержащиеся в семенах растений. Фитиновая кислота недорога, полностью биоразлагаема, при термолизе образует фосфорную кислоту и воду, действуя как эффективный антипирен. Пропитка сосны 5% раствором фитиновой кислоты привела к увеличению LOI с 19% до 28% и снижению пика тепловыделения на 55%. Другой подход — использование хитозана, производного хитина креветок и крабов. Хитозан сам

по себе склонен к карбонизации, а в смеси с фосфатами дает синергетический эффект. Многообещающи также золь-гель покрытия на основе тетраэтоксисилана (TEOS) и фосфатов титана. Такие покрытия при высыхании образуют на поверхности древесины невидимую стеклокерамическую пленку толщиной 100–200 нм, которая при нагреве превращается в прочную термостойкую корку. Исследователи из Технологического института Вирджинии показали, что золь-гель покрытие из диметилдиэтоксисилана с добавкой 10% наночастиц диоксида циркония снижает распространение пламени по поверхности древесины практически до нуля при испытании по стандарту UL 94, что соответствует классу V-0 (прекращение горения за 10 секунд). Технология пока дорога, но имеет перспективу для защиты исторических деревянных зданий, где нельзя изменять цвет или текстуру [3].

Влияние огнезащитной обработки на физико-механические свойства древесины остается предметом пристального изучения. В целом, все пропитки водными растворами увеличивают гигроскопичность: равновесная влажность может возрасти с 12% до 18–20%, что при перепадах температур ведет к короблению и растрескиванию. Особенно этим страдают фосфаты аммония. Бораты влияют меньше, а фосфорорганические антипирены даже снижают гигроскопичность, поскольку они гидрофобизируют поверхность пор. Прочность при сжатии вдоль волокон обычно снижается незначительно (до 5–8%), а вот прочность при скалывании и ударная вязкость могут упасть на 15–20% из-за кислотной деструкции гемицеллюлоз. Поэтому для несущих конструкций (балки, колонны) рекомендуются нейтральные или слабощелочные составы, например, смесь карбоната натрия и алюмосиликата. Для улучшения долговечности обработанной древесины часто добавляют гидрофобизаторы (силиконы, восковые эмульсии) и биоциды (для защиты от гниения, так как влажная древесина поражается грибом быстрее). Комплексные составы "огнебиозащита" — стандарт на современном рынке.

Важно подчеркнуть, что выбор конкретного метода и состава должен основываться на технико-экономическом анализе: для временных построек достаточно поверхностного нанесения боратов, для несущих конструкций жилого дома — автоклавной пропитки фосфорорганическими антипиренами с последующим гидрофобизатором, для объектов культурного наследия — золь-гель или ацетилирование.

Резюмируя, можно уверенно утверждать, что современная химия и технология материалов позволяют снизить горючесть древесины до уровня, сопоставимого с негорючими материалами в условиях стандартного пожара. Наилучшие результаты достигаются при комбинировании методов: глубокая пропитка фосфатсодержащим антипиреном с последующим нанесением интумесцентного лака. Такая система обеспечивает группу горючести Г1 при толщине защитного слоя 300–500 мкм и не требует обновления более 10 лет. Перспективы исследований лежат в области создания самовосстанавливающихся огнезащитных покрытий по аналогии с биологическими системами, а также в использовании отходов сельского хозяйства (рисовой шелухи, скорлупы арахиса) как источников кремния для золь-гель антипиренов. Древесина, переведенная в класс слабогорючих материалов, сохраняет все свои положительные качества — теплый дизайн, экологичность, удобство в обработке — но при этом перестает быть фактором риска. В условиях глобального перехода к биооснованной экономике это делает древесину материалом будущего для многоэтажного и общественного строительства, где ранее доминировали сталь и бетон. Однако следует помнить, что ни один антипирен не делает древесину абсолютно негорючей. Задача инженера — обеспечить такое время сопротивления пожару (обычно 30, 60 или 90 минут), чтобы люди успели эвакуироваться, а пожарные — потушить возгорание до обрушения конструкции. Следовательно, проектирование огнезащиты древесины всегда должно исходить из реальных

сценариев пожара и требований конкретного здания, а выбор антипирена — из не только из его паспортной эффективности, но и из долговременной стойкости, токсикологической безопасности и экономической целесообразности. Только при таком комплексном подходе можно реализовать огромный потенциал древесины как конструкционного материала XXI века.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Сайнашев М.Э. Анализ и оценка пожарной опасности мясоконсервного комбината // Экономика строительства. 2023. № 11. С. 86-88.
2. Аксенов С.Г., Божко Д.А. Огнетушитель как первичное средство пожарной безопасности транспортных средств // Грузовик. 2023. № 8. С. 36-39.
3. Литвинец Ю. И., Дедюхин В. Г., Смольникова Е. В. Исследование горючести облицовочной плитки из древесного пластика // Технология древесины, плит и пластиков / Уральская государственная лесотехническая академия. — Екатеринбург, 1995. — С. 56-62.
4. Лунева Н. К., Аринкин С. М., Воробьев В. К., Петушок И. А., Коматов В. С. Технология придания древесным материалам огнебиозащищенности с использованием полифосфорных соединений // Тезисы докладов I Всероссийской конференции по полимерным материалам пониженной горючести. — Волгоград, 1995. — С. 33-35.
5. Тычино Н. А., Яцукович А. Г. Огнезащитная пропиточная композиция для древесины, образующая пористый теплоизолирующий слой на ее поверхности // Пожаровзрывобезопасность. — 1999. — Т. 8, №1. — С. 35-39.