АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И ИСТОРИЯ ИСКУССТВ

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ: ХИМИЧЕСКАЯ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Султонова Гульноза Шокир кизи – независимый исследователь
Ташкент, Учтепинский район, 14-12-20 (Ташкент, Узбекистан)

Аннотация: *В статье рассмотрены современные методы повышения огнестойкости древесины, включая химическую обработку антипиренами, термическую модификацию и применение наноматериалов. На основе анализа научных источников и экспериментальных данных показано, что химическая обработка способствует быстрому формированию защитного слоя угля, термическая обработка изменяет структуру древесины, повышая её устойчивость к воспламенению, а нанопокрытия обеспечивают максимальный уровень огнестойкости за счёт создания многослойного барьера. Особое внимание уделено комбинированному использованию этих методов, что позволяет достичь синергетического эффекта и повысить предел огнестойкости древесины более чем в два раза по сравнению с необработанными образцами.*

Ключевые слова: *древесина, огнестойкость, антипирены, термическая модификация, наноматериалы, комбинированная защита.*

YOG‘OCHNING YONG‘INGA CHIDAMLILIGINI OSHIRISH USULLARI: KIMYOVIY, TERMIK ISHLOV BERISH VA NANOTEXNOLOGIYALAR

Gulnoza Shokir Sultonova – mustaqil tadqiqotchi
Toshkent, Uchtepa tumani, 14-12-20 (Toshkent, O‘zbekiston)

Annotatsiya: *Ushbu maqolada yog‘ochning yong‘inga chidamliligini oshirishning zamonaviy usullari tahlil qilingan bo‘lib, ularga antipirenlar bilan kimyoviy ishlov berish, termik modifikatsiya va nanomateriallardan foydalanish kiradi. Ilmiy manbalar va tajriba natijalariga asoslangan holda aniqlanishicha, kimyoviy ishlov berish natijasida tezda himoya ko‘mir qatlami hosil bo‘ladi, termik ishlov yog‘och tuzilmasini o‘zgartirib, uni alangalanishga nisbatan bardoshlilik darajasini oshiradi, nanopokritiyalar esa ko‘p qatlamli to‘siq yaratish orqali maksimal yong‘inga chidamlilikni ta’minlaydi. Maqolada ushbu usullarni kompleks qo‘llashga alohida e’tibor qaratilgan bo‘lib, bu yondashuv sinergetik ta’sir hosil qilib, yog‘ochning yong‘inga chidamlilik chegarasini ishlov berilmagan namunalar bilan solishtirganda ikki barobardan ortiq oshirish imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *yog‘och, yong‘inga chidamlilik, antipirenlar, termik modifikatsiya, nanomateriallar, kombinatsiyalangan himoya.*

METHODS FOR IMPROVING THE FIRE RESISTANCE OF WOOD: CHEMICAL, THERMAL TREATMENT, AND NANOTECHNOLOGIES

Gulnoza Shokir Sultonova – independent researcher
Tashkent, Uchtepa district, 14-12-20 (Tashkent, Uzbekistan)

Annotation *The article examines modern methods for improving the fire resistance of wood, including chemical treatment with flame retardants, thermal modification, and the use of nanomaterials. Based on a review of scientific literature and experimental data, it has been shown that chemical treatment promotes the rapid formation of a protective char layer, thermal modification alters the internal structure of wood and increases its ignition resistance, while nanocoatings provide the highest level of fire resistance by forming multilayer barrier systems. Special attention is given to the combined use of these methods, which produces a synergistic effect and doubles the fire resistance limit compared to untreated wood samples.*

Keywords: *wood, fire resistance, flame retardants, thermal modification, nanomaterials, combined protection.*

Введение Древесина на протяжении тысячелетий является одним из наиболее востребованных строительных материалов благодаря своей доступности, экологичности, лёгкости обработки и высокому соотношению прочности к массе. Однако существенным недостатком древесины остаётся её горючесть, что значительно ограничивает область применения этого материала в современном строительстве и архитектуре. По данным исследований В.Н. Киселёва и С.А. Фёдорова [1], около 40 % пожаров в жилых и общественных зданиях связано с использованием конструкций из древесины без должной противопожарной защиты. Поэтому разработка и внедрение эффективных методов повышения огнестойкости древесины является одной из приоритетных задач современной строительной науки.

Современные подходы к повышению огнестойкости древесины основаны на применении химических антипиренов, термической модификации и нанотехнологий, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. Химическая обработка позволяет насытить древесину соединениями, замедляющими процессы пиролиза и горения, что способствует образованию защитного слоя угля при воздействии высоких температур [2]. Термическая модификация, как отмечают Р. Миллер и И. Ву [3], изменяет химический состав и микроструктуру древесины, снижая её гигроскопичность и повышая устойчивость к воспламенению. Нанотехнологические методы, в свою очередь, позволяют формировать на поверхности древесины ультратонкие покрытия с высокими теплоотражающими и антипиреновыми свойствами, что значительно увеличивает предел огнестойкости материала [4].

В последние годы исследования в этой области приобретают междисциплинарный характер, объединяя достижения химии, физики материалов, нанотехнологий и строительной инженерии. Так, А.Н. Шевченко [5] подчёркивает, что только комплексный подход, включающий комбинированное применение различных видов обработки, способен обеспечить долговременную защиту древесины от воздействия открытого пламени.

Эффективность таких методов подтверждается многочисленными экспериментальными данными, демонстрирующими повышение предела огнестойкости образцов древесины в 2–3 раза по сравнению с необработанными материалами.

Цель данной работы заключается в анализе и сравнении эффективности трёх основных направлений повышения огнестойкости древесины — химической обработки, термической модификации и нанесения покрытий на основе наноматериалов. Особое внимание уделено механизму защитного действия указанных методов, а также их комбинированному применению для достижения максимальной пожаростойкости конструкционных элементов.

Химическая обработка древесины как метод повышения огнестойкости.

Химическая обработка древесины является одним из наиболее распространённых и результативных методов повышения её огнестойкости. Суть данного подхода заключается в пропитке древесины

антипиренами — химическими веществами, замедляющими процессы термического разложения и горения органических компонентов. Наиболее эффективными считаются составы на основе фосфатов, бора и аммония, которые при нагревании образуют защитный слой угля и препятствуют выделению горючих газов [6, с. 47].

Как отмечает Л.М. Корнилов [7], при термическом воздействии антипирены вступают в эндотермические реакции, поглощая тепло и снижая температуру воспламенения древесины. Это приводит к образованию плотного углеродного слоя, который изолирует нижележащие слои материала от кислорода воздуха. В результате скорость распространения пламени уменьшается, а общая потеря массы древесины при горении сокращается на 25–40 % по сравнению с необработанными образцами.

Исследования, проведённые Ю.В. Беляевым и соавт. [8], показали, что применение комплексных составов, включающих фосфорорганические соединения и силикаты, позволяет достичь более стабильного защитного эффекта даже после многократного воздействия влаги и ультрафиолета. Это особенно важно при использовании древесины в наружных конструкциях и фасадных элементах зданий. Кроме того, современные технологии пропитки, основанные на вакуумно-давленческом методе, обеспечивают глубокое проникновение растворов антипиренов в толщу древесины, что повышает долговечность огнезащиты.

С точки зрения экологической безопасности, химическая обработка вызывает определённые споры. Ряд исследователей (например, П.Н. Логинов [9]) указывают на возможность выделения токсичных газов при нагревании некоторых традиционных антипиренов, содержащих хлор и бром. Поэтому в последние годы особое внимание уделяется разработке экологически безопасных составов на основе бора и кремния, не выделяющих вредных веществ в процессе эксплуатации и воздействия высоких температур.

Таким образом, химическая обработка остаётся эффективным и технологически доступным способом повышения огнестойкости древесины. Однако её долговечность и стабильность зависят от состава антипирена, условий эксплуатации и способа пропитки. Комбинированное применение химических методов с термической модификацией или нанопокрытиями позволяет значительно улучшить результаты и обеспечить долговременную защиту конструкционных элементов.

Термическая обработка древесины и её влияние на огнестойкость.

Термическая обработка древесины представляет собой метод модификации её структуры путём нагревания при температуре от 160 до 250 °C в контролируемой среде — как правило, в инертной атмосфере, насыщенной водяным паром или азотом. Основная цель такой обработки заключается в изменении химического состава древесины, уменьшении содержания гидроксильных групп и улучшении её устойчивости к воздействию влаги, микроорганизмов и огня [10, с. 112].

Согласно данным исследований О.В. Мельниковой и М.Г. Ларина [11], термическая модификация изменяет баланс органических компонентов древесины — в частности, происходит частичная деградация гемицеллюлоз, сопровождающаяся снижением выделения летучих горючих веществ при нагревании. Это приводит к повышению температуры воспламенения и уменьшению интенсивности горения. Более того, благодаря снижению гигроскопичности древесина после термообработки становится менее подверженной колебаниям влажности, что также способствует стабильности защитного эффекта.

Экспериментальные исследования, проведённые в Финляндии и Нидерландах (Jämsä & Viitaniemi, 2001 г.) [12], показали, что после нагрева до 210 °C содержание воды в клеточных структурах древесины снижается почти в два раза, а предел огнестойкости увеличивается в среднем на 30

%. Аналогичные результаты были получены в работе Д.В. Гордеева [13], где отмечено, что степень термической модификации прямо коррелирует с уменьшением скорости пиролиза и теплового разложения древесных компонентов.

Однако термическая обработка имеет и свои ограничения. При превышении оптимальной температуры (более 240–250 °C) начинается разрушение целлюлозной матрицы, что приводит к ухудшению механических свойств материала — снижению прочности на изгиб и растяжение [14]. Поэтому важным фактором является баланс между степенью термической модификации и сохранением конструкционной целостности древесины.

В последние годы разрабатываются комбинированные технологии, совмещающие термическую обработку с нанесением нанопокрытий или химических антипиренов. Так, по данным Хуанг и соавт. (2022) [15], предварительная термическая модификация способствует лучшему закреплению наночастиц оксида кремния на поверхности древесины, что вдвое увеличивает предел термостойкости по сравнению с необработанными образцами.

Таким образом, термическая обработка является экологически чистым, относительно простым и эффективным методом повышения огнестойкости древесины, особенно при сочетании с другими способами защиты. Её преимущество заключается в отсутствии токсичных отходов и способности обеспечить долговременное изменение структуры материала без использования химических реагентов.

Наноматериалы и инновационные покрытия для повышения огнестойкости древесины.

Развитие нанотехнологий в последние десятилетия открыло новые перспективы в области повышения огнестойкости древесины. Использование наноматериалов позволяет создавать покрытия с уникальными физико-химическими свойствами, которые обеспечивают многослойную защиту от термического воздействия и препятствуют распространению пламени. Как отмечает В.В. Сидоренко [16], наночастицы способны взаимодействовать с компонентами древесины на молекулярном уровне, формируя барьер, устойчивый к высоким температурам и окислению.

Наиболее широко применяются наночастицы оксидов металлов — диоксида титана (TiO_2), оксида кремния (SiO_2), алюминия (Al_2O_3) и магния (MgO). Они обладают высокой термостабильностью и способностью отражать инфракрасное излучение, снижая тепловой поток к поверхности материала [17]. Исследования, проведённые C. Zhang и соавт. [18], показали, что нанесение нанопокрытия на основе TiO_2 толщиной 200 нм снижает температуру воспламенения древесины на 18 % и увеличивает время до загорания в среднем на 45 секунд.

Особое внимание уделяется нанокомпозитным покрытиям, включающим органические и неорганические компоненты. Такие покрытия сочетают гибкость полимерной матрицы и прочность неорганических наночастиц, обеспечивая комплексную защиту от тепла, влаги и ультрафиолетового излучения [19]. Например, комбинированное использование наночастиц SiO_2 с фосфорорганическими соединениями способствует образованию термостабильного карбонизированного слоя, который эффективно блокирует доступ кислорода к древесине при температуре выше 400 °C [20].

В последние годы активно исследуются **наночастицы графена** и **графеновых оксидов**, обладающие уникальной теплопроводностью и химической инертностью. По данным Li и соавт. [21], древесина, обработанная графеноксидными покрытиями, демонстрирует повышение предела огнестойкости на 60–70 % благодаря образованию плотного графитоподобного слоя. Кроме того, такие покрытия улучшают влагостойкость и предотвращают разрушение материала при резких перепадах температуры.

С технологической точки зрения, нанопокрытия наносятся на древесину

различными методами: методом погружения, распыления, плазменного осаждения или сол-гель технологией. Последний метод считается наиболее перспективным, поскольку обеспечивает равномерное распределение наночастиц по поверхности и прочную адгезию с клеточной структурой древесины [22].

Тем не менее, несмотря на высокую эффективность нанопокрытий, их широкое промышленное внедрение сдерживается из-за высокой стоимости наноматериалов и технологической сложности производства. Поэтому в современной науке активно ведутся исследования, направленные на снижение себестоимости таких покрытий за счёт использования природных наноструктурированных материалов, например, модифицированной целлюлозы и наноглины [23].

Таким образом, применение нанотехнологий открывает принципиально новые возможности для повышения огнестойкости древесины. В сочетании с химической и термической обработкой нанопокрытия формируют комплексную защитную систему, обеспечивающую долговременную и экологически безопасную огнезащиту деревянных конструкций.

Метод обработки	Среднее повышение предела огнестойкости	Преимущества	Ограничения	Рекомендуемое применение
Химическая обработка	+25–40 %	Быстродействие, технологическая доступность, совместимость с различными породами древесины	Снижение эффективности при воздействии влаги, возможная токсичность некоторых антипиренов	Внутренние конструкции, мебель, декоративные элементы
Термическая обработка	+30–50 %	Экологическая чистота, повышение стабильности структуры, долговечность	Снижение механической прочности при перегреве >240 °C	Наружные конструкции, фасадные панели, паркет
Нанопокрытия	+60–70 %	Максимальная огнезащита, устойчивость к УФ-излучению, влагонепроницаемость	Высокая стоимость, технологическая сложность нанесения	Высокотехнологичные объекты, элементы премиум-класса
Комбинированные методы	До +100 %	Синергетический эффект, долговременная защита, устойчивость к внешним факторам	Необходимость комплексного оборудования, трудоёмкость	Несущие деревянные конструкции, архитектурные сооружения

Проведённый анализ показал, что повышение огнестойкости древесины является сложной междисциплинарной задачей, требующей сочетания химических, физических и технологических методов. Каждый из рассмотренных подходов — химическая обработка, термическая модификация и применение нанопокрытий —

обладает собственными преимуществами и ограничениями, однако их комбинированное использование позволяет достичь наилучших результатов.

Химическая обработка антипиренами остаётся одним из наиболее доступных и технологически освоенных методов, обеспечивающим формирование защитного слоя при воздействии высоких температур. Термическая обработка, в свою очередь, изменяет структуру древесины на молекулярном уровне, снижая её гигроскопичность и способность к воспламенению без применения токсичных веществ. Нанотехнологические покрытия представляют собой наиболее современное и перспективное направление, позволяющее добиться значительного увеличения предела огнестойкости благодаря созданию многослойных барьерных структур.

Особо важно отметить, что интеграция перечисленных методов обеспечивает **синергетический эффект**, при котором совокупная огнезащита значительно превосходит эффективность каждого отдельного способа. Результаты многочисленных исследований [6–23] подтверждают, что комплексное применение термической модификации, химической пропитки и нанопокрытий способно повысить предел огнестойкости древесины более чем в два раза по сравнению с необработанными образцами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка экологически безопасных антипиренов нового поколения, снижение себестоимости наноматериалов, а также внедрение «умных» покрытий, способных реагировать на изменение температуры и автоматически активировать защитные механизмы. Кроме того, требуется дальнейшая стандартизация методов испытаний и оценка долговечности огнезащитных систем в реальных эксплуатационных условиях.

Таким образом, результаты работы подтверждают высокую эффективность комплексных методов повышения огнестойкости древесины и их потенциал для широкого внедрения в строительную практику. Современные технологии позволяют не только значительно увеличить пожарную безопасность деревянных конструкций, но и сохранить их экологическую чистоту, эстетичность и природные свойства, что делает древесину конкурентоспособным материалом XXI века.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв В.Н., Фёдоров С.А. Противопожарная защита строительных материалов. — М.: Академия МЧС России, 2018. — 276 с.

2. Лобанов И.А. Химическая модификация древесины антипиренами. — СПб.: Лесотехнический университет, 2019. — 142 с.

3. Miller R., Wu I. Thermal modification of wood: Structure and property changes. // *Wood Science and Technology.* — 2018. — Vol. 52(3). — P. 541–556.

4. Zhang X., Liu J., Wang Y. Nanocoatings for wood fire resistance: A review. // *Progress in Organic Coatings.* — 2021. — Vol. 158. — P. 106–125.

5. Шевченко А.Н. Современные методы повышения долговечности и огнестойкости древесины. // *Вестник МГСУ.* — 2020. — №6. — С. 78–85.

6. Корнилов Л.М. Влияние химической обработки на пожарную безопасность строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 2017. — 215 с.

7. Беляев Ю.В., Михайлова Н.П., Данилов С.Г. Комплексные антипирены для защиты древесины. // *Химия древесины.* — 2019. — Т. 39, №4. — С. 54–61.

8. Логинов П.Н. Экологические аспекты применения антипиренов. // *Безопасность труда и химическая экология.* — 2020. — №3. — С. 92–98.

9. Мельникова О.В., Ларин М.Г. Термическая модификация древесины и её влияние на физико-химические свойства. // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* — 2021. — №2. — С. 110–118.

10. Jämsä S., Viitaniemi P. Heat treatment of wood — Better durability without chemicals. // *In Proceedings of the COST Action E22 Conference.* — Finland, 2001. — P. 17–22.

11. Гордеев Д.В. Влияние температурной обработки на свойства древесины хвойных пород. // *Материалы Международной конференции «Инновации в деревообработке».* — Томск, 2020. — С. 203–210.

12. Сидоренко В.В. Наноструктурированные материалы для защиты строительных поверхностей. — Новосибирск: Наука, 2019. — 198 с.

13. Zhang S., Li Q., Liu P. Fire performance of TiO_2 nanoparticle coatings on wood substrates. // *Journal of Fire Sciences.* — 2020. — Vol. 38(5). — P. 391–405.

14. Кузнецов А.Г. Применение наночастиц оксидов металлов для повышения огнестойкости древесины. // *Строительные материалы и технологии XXI века.* — 2021. — №8. — С. 56–62.

15. Huang C., Zhang H., Yang J. Thermal and flame-retardant properties of SiO_2 nanocomposites on wood. // *Construction and Building Materials.* — 2022. — Vol. 323. — P. 126–134.

16. Li Y., Chen X., Zhou D. Flame-retardant performance of graphene oxide-modified wood. // *Composites Part B: Engineering.* — 2021. — Vol. 223. — P. 109–119.

17. Хуснутдинов А.А., Ахметова И.Р. Сол-гель технологии нанесения нанопокрытий. // *Нанотехнологии в строительстве.* — 2020. — №4. — С. 43–49.

18. Ким Ю.С. Механизмы взаимодействия наночастиц с поверхностью древесины. // *Химия и технология органических материалов.* — 2021. — №3. — С. 77–83.

19. Князев А.В., Тихонова Е.В. Комбинированные нанокомпозиты для защиты древесины. // *Вестник СПбГТУ.* — 2022. — №2. — С. 58–66.

20. Попова Л.А., Еремеев С.Г. Экспериментальное исследование нанопокрытий для повышения огнестойкости древесины. // *Строительные науки и технологии.* — 2023. — №1. — С. 41–48.

21. Мальцев В.В. Перспективы применения наноматериалов в строительстве. — М.: Лань, 2023. — 245 с.

22. Литвиненко Н.П., Павлова Ю.А. Комплексная защита древесины от огня: перспективы и технологии. // *Материалы и конструкции.* — 2024. — №2. — С. 33–40.

23. Чернышев С.А. Термостойкость древесины после комбинированной обработки. // *Инженерные системы и технологии.* — 2024. — №3. — С. 101–108.