

Ж. К. МАКИШЕВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: makishev_jkkti@mail.ru)

А. Б. СИВЕНКОВ, д-р техн. наук, доцент, ученый секретарь, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: sivenkov01@mail.ru)

УДК 614.8:699.8

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Представлены результаты исследования огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации. Установлено, что временной фактор имеет значительное влияние на интенсивность обугливания деревянных конструкций, а также на температуру начала данного процесса. Обнаружено, что древесина с длительным сроком эксплуатации теряет свои первоначальные прочностные свойства уже при температуре 80 °С. С помощью физико-химических методов изучены свойства и структура угольных остатков, их окислительная и теплопроводная способность. Проведены крупномасштабные испытания по оценке огнестойкости деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в соответствии с ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94.

Ключевые слова: древесина; деревянные конструкции; срок эксплуатации; пиролиз; механическая прочность; огнестойкость; обугливание.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44

Введение

Деревянные конструкции остаются одними из самых применяемых и востребованных при строительстве зданий и сооружений жилого, общественного, производственного, складского, животноводческого и сельскохозяйственного назначения. Наиболее динамичное развитие строительной индустрии с применением строительных конструкций из древесины наблюдается в России, бывших странах СНГ, ряде Европейских стран, Австралии, Японии, Канаде и США. Во многом это объясняется эстетической декоративностью, относительно высокой механической прочностью и устойчивостью этих конструкций к воздействию внешней окружающей среды [1].

Уникальными примерами долговечности деревянных конструкций служат такие объекты, как Гринстедская церковь (Гринстед, Эссекс, Великобритания, 1045 г.), церковь Воскрешения Лазаря (Кизи, Архангельская обл., Россия, 1391 г.), церковь Святого Николая Чудотворца в Колодном (Закарпатье, Украина, 1470 г.), Успенская церковь (с. Нелазкое, Вологодская обл., Россия, 1694 г.), Михаило-Архангельский собор (г. Уральск, Республика Казахстан, 1750 г.) и многие другие.

В последние десятилетия пристальное внимание научного сообщества было обращено на изменение качественных характеристик древесины в результате продолжительной эксплуатации деревянных конструкций зданий и сооружений [2–4]. В этих работах было показано значительное влияние длитель-

ного естественного старения на физико-химические, механические и другие свойства древесины в результате трансформации ее структуры и происходящих в ней химических превращений.

Несмотря на это малоизученным остается вопрос о влиянии продолжительного естественного старения на пожароопасные свойства древесины. Анализ пожаров свидетельствует о необычном поведении объектов с деревянными конструкциями с продолжительным сроком эксплуатации в условиях воздействия высоких температур. Характерными особенностями таких пожаров являются: аномально высокая температура, быстрое развитие пожара и значительная степень термического повреждения конструкций из древесины. Примерами деревянных объектов с длительным сроком эксплуатации, утраченных в результате пожаров, являются Костел Святой Катерины (Острава, Чехия, 1543 г.), церковь Богоявления (Воскресенский монастырь Нового Иерусалима (Московская обл., Россия, 1673 г.), церковь Спаса на сваях (Ипатьевский монастырь, г. Кострома, Россия, 1713 г.), церковь Покрова Пресвятой Богородицы (Узденский район, Минская обл., Республика Беларусь, 1898 г.), дом тканей “Кызыл-Тан” (г. Алматы, Республика Казахстан, 1912 г.) и десятки других исторических памятников мирового наследия.

Изучению нестандартного поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара и их пожарной опасности посвя-

щено относительно немного работ [5–8]. В них впервые был установлен факт существования нового вида угрозы для человека, обусловленного спецификой поведения в условиях пожара конструкций из древесины с длительным сроком эксплуатации.

Одним из главных требований, предъявляемых к конструкциям из древесины с ограждающими или несущими функциями, является обеспечение приемлемой огнестойкости. Изменение в условиях пожара прочностных и геометрических характеристик сечений вызывает снижение несущей способности элементов и узлов деревянных конструкций, выраженной пределом огнестойкости конструкции. Однако вопрос об изменении показателей огнестойкости деревянных конструкций в результате длительной эксплуатации остается неизученным. Отсутствие научных исследований в этом направлении, а также неучет создателями нормативной и справочной баз в области пожарной безопасности такого фактора, как продолжительность эксплуатации конструкций, определяет актуальность данных исследований. В работе представлялось важным выяснить, как количественно изменяется не только предел огнестойкости деревянных конструкций с увеличением срока их службы, но и параметры их обугливания, а также какое влияние оказывает длительное воздействие окружающей среды на интенсивность и особенности формирования обугленного слоя, его физическую структуру в условиях пожара.

Объекты и методы исследования

Для исследования были взяты цельные деревянные конструкции длиной от 1,5 до 3,5 м. Основные характеристики исследуемых образцов конструкций представлены в табл. 1.

В работе был использован комплекс современных методов исследования: методы термического ана-

лиза (ТГ, ДТГ, ДСК), метод сорбции паров, метод определения физико-механических показателей материалов. Для определения параметров обугливания в условиях воздействия стандартного температурного режима пожара была использована экспериментальная маломасштабная огневая печь с возможностью реализации стандартного температурного режима пожара, а также крупномасштабная огневая печь для оценки огнестойкости строительных конструкций в соответствии с требованиями ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе образцов деревянных конструкций было установлено, что при увеличении срока эксплуатации наблюдается повышение плотности древесины, обусловленное удалением легколетучих низкокипящих компонентов из древесного материала, усушкой и трансформацией его морфологической структуры. Изменение структуры древесины сказывается на ее физико-механических характеристиках, которые являются определяющими при оценке огнестойкости деревянных конструкций. В работе было изучено изменение плотности и прочности образцов древесины, подвергавшейся процессу естественного старения, при воздействии температуры в условиях пожара. Температурное воздействие на образцы осуществлялось в муфельной печи и длилось от 30 мин до 2 ч. Оценка изменения предела прочности деревянных конструкций на сжатие вдоль волокон проводилась с помощью электромеханической универсальной испытательной машины TIME WDW-50E.

Полученные результаты показывают, что при усилении температурного воздействия на образцы древесины с различными сроками эксплуатации наблю-

Таблица 1. Основные характеристики образцов деревянных конструкций

Номер образца	Деревянная конструкция	Место отбора образцов	Срок эксплуатации, лет	ρ , кг/м ³ *
0	Деревянная балка (древесина сосны)	Архангельская обл., Россия (современная древесина)	–	452
1	Элементы стропильной части дома (древесина сосны)	Нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская обл., Республика Казахстан	63	477
2	Внутренние элементы конструкций (древесина сосны) межэтажного перекрытия (между 1-м и подвальным этажами)	Театр кукол “Гулливер” (1890 г.), г. Курган, Россия	125	588
3	Деревянные несущие конструкции (древесина сосны)	Церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл., Россия	150	643
4	Элементы стропильной части дома (древесина сосны)	Нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан	87	546

* Влажность образцов древесины перед проведением огневых испытаний составляла 12 %.

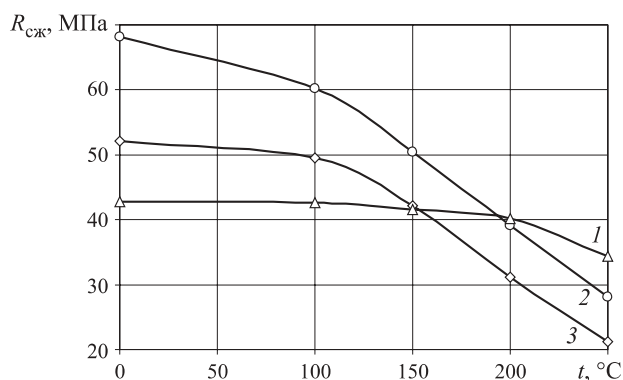


Рис. 1. Изменение предела прочности образцов древесины сосны на сжатие вдоль волокон $R_{сж}$ в зависимости от температуры: 1 — современная древесина (Архангельская обл.); 2 — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливер”, г. Курган; 3 — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

дается снижение их плотности и предела прочности на сжатие вдоль волокон (рис. 1).

Интересно отметить, что для древесины, подвергавшейся длительному естественному старению, процесс снижения предела прочности происходит при меньшей температуре по сравнению с современной древесиной. Для деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации потеря первоначальных механических свойств наблюдается уже при 80 °C, а при температуре 250 °C она достигает 60 %. Для современной древесины начальное снижение механических свойств древесины происходит только при температурах выше 150 °C, что подтверждается результатами ранее проведенных исследований [9].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что на предел прочности образцов древесины с длительным сроком эксплуатации при воздействии температур до 250 °C в большей степени оказывают влияние процессы термодеструкции и карбонизации, протекание которых с ростом продолжительности эксплуатации деревянной конструкции смещается в низкотемпературную зону, по сравнению с древесиной современной. Подтверждением этого являются результаты, полученные методами термического анализа (ТГ, ДТГ, ДСК). С использованием данных методов были изучены особенности процесса обугливания древесины с различными сроками эксплуатации. Образцы материалов в виде фрагментов правильной формы помещались в тигель термоанализатора Q600 SDT. Навеска образцов изменялась в пределах 1,0–8,5 мг. Нагрев проводился со скоростью 20 °C/мин в токе азота до 500 °C. Далее меняли газ носителя с азота на воздух. Процесс термодеструкции и термоокисления записывался как по ТГА-сигналу, так и по ДСК. Совмещенные ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривые представлены на рис. 2.

ТГ- и ДТГ-кривые показывают, что на начальной стадии (температурный диапазон 100–250 °C) происходит более интенсивная потеря массы образцов древесины с длительным сроком эксплуатации по сравнению с образцами современной древесины. В этот период, очевидно, начинается образование угольных структур, что отражается на снижении скорости потери массы на основном участке полученных термограмм (300–400 °C). Последующее повышение температуры приводит к более активной стадии окисления образующегося угольного слоя у образца древесины, подвергавшейся длительному естественному старению. При этом на кривых ДТГ и ДСК зафиксировано значительное повышение скорости потери массы, величины теплового эффекта и скорости тепловыделения при окислительном процессе. Расчет кинетических параметров по ДСК-кривым осуществлялся по методу Борхардта-Дэниельса. Значения энергии активации процесса окисления угольного слоя указывают на снижение энергетических затрат, необходимых для начала данного процесса, а уменьшение значений логарифма предэкспоненты может свидетельствовать об образовании упорядоченного по своей структуре угля (табл. 2).

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что на начальной и основной стадиях термического разложения образцов древесины с длительным сроком эксплуатации вследствие раннего углеобразования наблюдается снижение скорости потери массы образцов. Однако при дальнейшем повышении температуры проявляется негативная роль угольного остатка, обусловленная его высокой способностью к окислению и выделению значительного количества тепла. Для образца древесины со сроком эксплуатации 150 лет скорость тепловыделения фактически в 1,5 раза выше по сравнению с образцами современной древесины.

Повышение интенсивности процесса обугливания конструкций из древесины, подвергавшейся длительному естественному старению, подтверждается результатами экспериментальной оценки параметров обугливания в условиях стандартного температурного режима пожара. При одностороннем нагреве на маломасштабной установке продолжительность испытаний составила 30 мин. Образец крепился с помощью специального держателя в виде рамки. Для измерения температуры были использованы лепестковые хромель-алюмелевые термопары. Термопары подсоединялись к контрольно-измерительному прибору “Элемер”, подключенному к персональному компьютеру для регистрации показаний. Испытания проводились для каждой серии на трех образцах толщиной 30–40 мм, имеющих форму квадрата со стороной 150 мм. Кроме того, огневые испытания

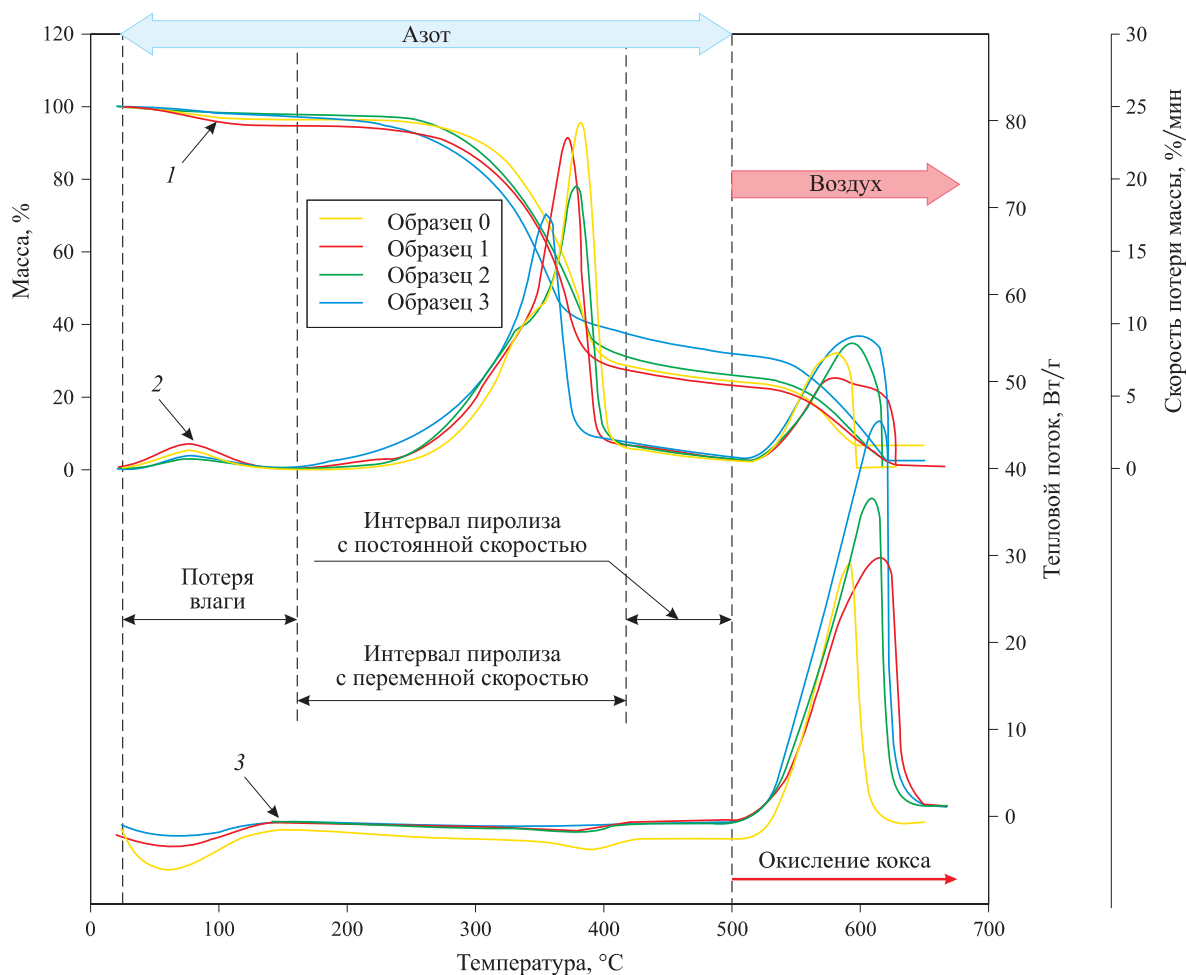


Рис. 2. Результаты термического анализа (ТГ, ДТГ, ДСК) исследуемых образцов древесины сосны с различными сроками эксплуатации (номера образцов см. в табл. 1)

Таблица 2. Характеристики процесса окисления угольного остатка для образцов древесины с различными сроками эксплуатации

Номер образца	Расчетный параметр по ДСК-кривым				
	Тепловой эффект*, Дж/г	Скорость тепловыделения**, Вт/г	Энергия активации, кДж/моль	Логарифм предэкспоненты, 1/мин	Приведенный порядок реакции
0	15318	30,2	331,0	20,15	1
1	25218	28,9	247,9	14,60	1
2	21580	37,3	249,8	14,82	1
3	22176	46,6	240,7	14,23	1

* Тепловой эффект отнесен к массе угольного остатка.
 ** Скорость тепловыделения отнесена к первоначальной массе образца.

проводились на образцах деревянных балок сечением 150×150 мм и длиной 1,5 м.

В табл. 3 представлены результаты оценки параметров обугливания (толщина угольного слоя δ_k , скорость обугливания v , плотность угольного остат-

ка ρ_k , время начала пламенного горения τ_0) исследуемых образцов в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара.

Результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что при увеличении срока эксплуатации деревянных конструкций наблюдается интенсификация процесса обугливания древесины. Так, в условиях стандартного температурного воздействия на деревянные конструкции со сроком эксплуатации 150 лет (церковь Николая Чудотворца, Брянская обл.) скорость обугливания древесины была в 2,6 раза выше по сравнению с современной.

Плотность образующегося угольного остатка с увеличением срока эксплуатации древесины значительно снижается. Это может свидетельствовать о том, что образующийся угольный слой обладает развитой пористой структурой и более низкими теплофизическими характеристиками по сравнению с образцами современной древесины. Образование подобных угольных структур, наряду с уменьшением количества легколетучих компонентов в древесине, подвергавшейся продолжительному естественному

Таблица 3. Результаты оценки параметров обугливания элементов деревянных конструкций в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара

Номер образца	Образец	ρ , кг/м ³ *	δ_k , мм	v , мм/мин	ρ_k , кг/м ³	τ_0 , с
1	Древесина сосны современной	452	16,5	0,62	252	224
2	Древесина сосны, нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская обл., Республика Казахстан	477	24	0,94	246	280
3	Древесина сосны, нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан	546	28	1,1	237	295
4	Древесина сосны, элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”, г. Курган	588	31	1,26	224	325
5	Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.	643	35	1,43	220	335
6	Сосна, несущая деревянная балка (сечением 150×150 мм, длиной 1,5 м)	452	13	0,5	258	310
7	Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская область (балка сечением 150×150 мм, длиной 1,5 м)	643	33	1,3	215	420

* Плотность образцов древесины перед проведением огневых испытаний составляла 12 %.

старению, приводит к повышению устойчивости материала к воспламенению. Для всех исследуемых образцов древесины с длительным сроком эксплуатации увеличивается время начала пламенного горения.

На рис. 3 представлены фотоснимки поверхности исследуемых образцов древесины после огневых испытаний в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара.

Из фотоснимков видно, что для современной древесины сосны характерно значительное обугливание с образованием глубоких усадочных трещин. Для образцов с длительным сроком эксплуатации, наряду с высокой степенью термического повреждения, характерны “следы” переугливания верхних угольных слоев вследствие их высокой окислительной активности, интенсивного тепловыделения и создания высокотемпературного поля в зоне пиро-

лиза поверхностного слоя. Эти особенности процесса обугливания, свойства и структура угольного слоя являются определяющими при рассмотрении поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара и их огнестойкости.

Для исследования характеристик поверхностного угольного слоя был использован метод сорбции паров. Адсорбент представлял собой угольный порошок мелкой фракции (0,3–0,5 мм). Образцы угля были отобраны с образцов древесины, испытанных в маломасштабной установке в условиях стандартного температурного режима пожара. В качестве адсорбата использовался бензол, поскольку это вещество имеет большое поверхностное натяжение и может смачивать поверхность капилляров древесины. Кинетические кривые адсорбции угольных остатков исследуемых образцов представлены на рис. 4.



Рис. 3. Вид поверхности образцов древесины после огневых испытаний в маломасштабной установке: а — современной (Архангельская обл.); б — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”, г. Курган; в — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

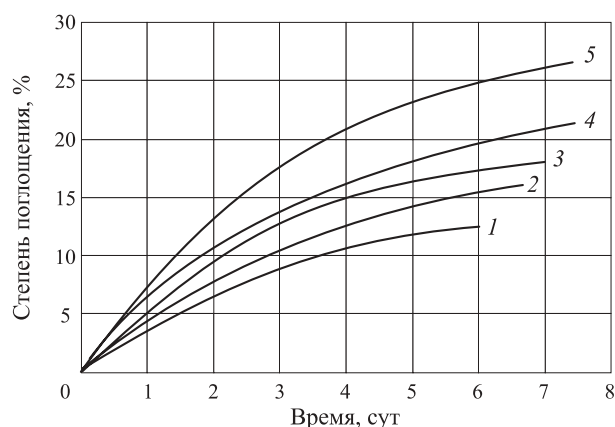


Рис. 4. Кинетические кривые сорбции паров бензола для угольных остатков у образцов древесины сосны с различными сроками эксплуатации: 1 — современная древесина; 2 — нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская область, Республика Казахстан; 3 — нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан; 4 — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”; 5 — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

Из рис. 4 видно, что максимальные значения прироста адсорбата наблюдаются у угольного остатка древесины сосны со сроком эксплуатации 150 лет (26,76 %), что фактически в 2 раза превышает степень поглощения a_m образцов углей для древесины современной (14,8 %). Для угольного остатка современной древесины характерно быстрое насыщение парами адсорбента на начальном этапе и дальнейшая стабилизация кривой. Полное насыщение образцов парами бензола происходит за 6 сут.

Для угольного остатка древесины длительного естественного старения характерно медленное насыщение на начальном этапе (первые 2–3 ч), дальнейшая интенсификация процесса и равномерное насыщение. Как показывают результаты испытаний, период поглощения паров бензола для древесины естественного старения более длительный по сравнению с образцом древесины современной. Полное насыщение образцов парами бензола происходит на 8-е сутки, что подтверждает высказывание о более развитой структуре угольного слоя у древесины, подвергавшейся длительному естественному старению.

Для объяснения полученных результатов были рассчитаны характеристики пористой структуры угольных остатков: суммарный объем пор V_Σ , средний радиус пор d_{cp} и удельная площадь поверхности угольных слоев $S_{уд}$. Результаты расчетов характеристик структуры угольных слоев приведены в табл. 4.

Таким образом, при увеличении срока эксплуатации деревянных конструкций наблюдается активная интенсификация процесса обугливания в усло-

Таблица 4. Характеристики пористой структуры угольных слоев

Номер образца	a_m , %	V_Σ , см ³ /г	d_{cp} , нм	$S_{уд}$, м ² /г
1	14,8	0,4726	25,03348	377,5744
2	16,53	0,3968	20,56678	823,7534
3	18,48	0,6812	18,51378	1038,637
4	21,81	0,6327	12,80586	1554,8574
5	26,76	0,5234	14,65459	1645,7461

виях пожара. Некоторое снижение потери массы на основном участке терморазложения древесины обусловлено особенностями мелкопористой структуры угольного слоя и, по всей видимости, снижением его теплопроводности. Однако в дальнейшем при повышении температуры образованная угольная структура с увеличенной удельной площадью поверхности и удельным объемом пор способствует его повышенной окисляемости, выгоранию и беспламенному (тлеющему) горению. Изменение химического состава древесины и значительная трансформация структуры в результате ее длительной эксплуатации приводят к ускорению процесса обугливания деревянных конструкций, снижению температурного порога утраты первоначальных механических характеристик древесины, что неминуемо скажется на пределе огнестойкости деревянных конструкций.

В подтверждение полученных результатов была проведена экспериментальная оценка огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации в условиях крупномасштабных огневых испытаний. Огневые испытания по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 проводились в целях определения времени с момента начала одностороннего теплового воздействия до наступления предельного состояния конструкции по огнестойкости R , глубине и скорости обугливания, а также времени прогрева деревянной балки по глубине.

На испытания был представлен образец несущей балки из древесины сосны, произрастающей в Архангельской обл. (влажность 12,0 %, плотность 452 кг/м³), и образец несущей балки из древесины сосны из Церкви Николая Чудотворца (Брянская обл., 1865 г. постройки) (влажность 12,0 %, плотность 643 кг/м³). Сечение деревянных конструкций — 200×200 мм, длина — 3500 мм.

По результатам огневых испытаний проводилась оценка скорости обугливания, толщины обугливания, времени воспламенения и температуры по толщине балки (размещение термоэлектрических преобразователей внутри образца представлено на рис. 5).

Образцы нагружались в центре испытательной нагрузкой массой 150 кг перед началом проведения

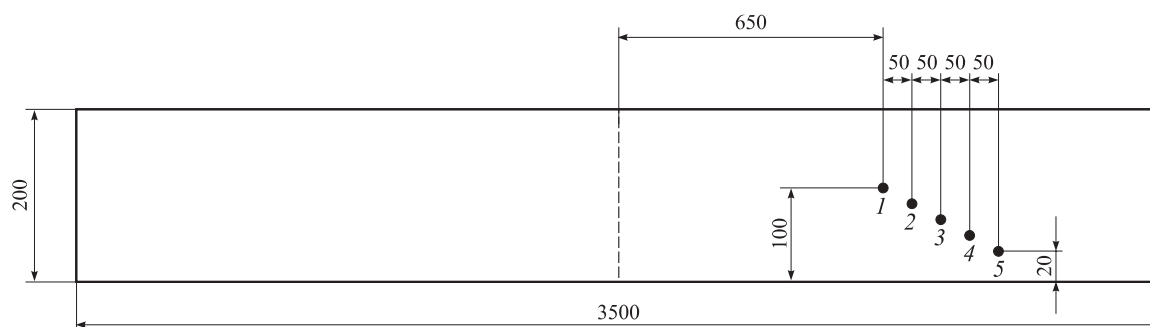


Рис. 5. Схема установки термоэлектрических преобразователей внутри образца деревянной балки



Рис. 6. Фрагмент образца деревянной балки во время огневых испытаний

испытаний. Время испытаний для всех образцов составляло 30 мин. При приложении нагрузки было обеспечено условие, при котором в случае возможной деформации конструкции груз не смещался и не влиял на предел огнестойкости вследствие изменения условий теплообмена с окружающей средой. На рис. 6 представлен фрагмент деревянной балки в камере огневой печи во время испытаний.

Наиболее важным в этой серии испытаний представлялась регистрация параметров обугливания деревянных конструкций в условиях стандартного температурного режима пожара. Значения глубины и

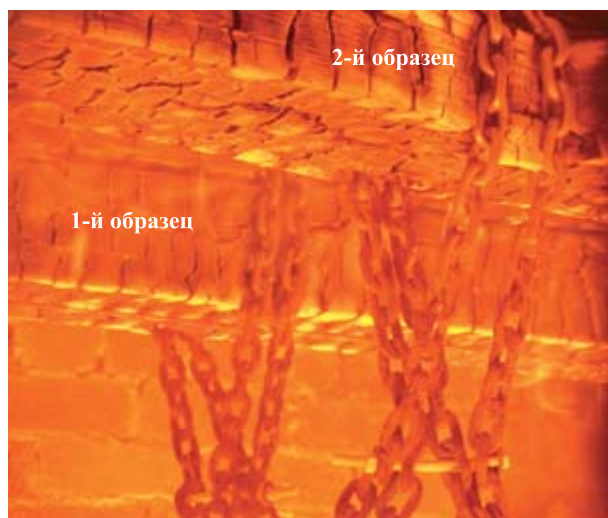


Рис. 7. Общий вид образцов деревянных балок под нагрузкой во время огневых испытаний

скорости обугливания деревянных конструкций (балок) приведены в табл. 5.

Результаты, представленные в табл. 5, показывают, что для деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации интенсивность процесса обугливания во время огневых испытаний повышается фактически в 1,8 раза по сравнению с современной балкой. Значения скорости обугливания для совре-

Таблица 5. Значения глубины и скорости обугливания деревянных конструкций (балок)

Образец	Показатель	Место измерения — расстояние от торцевой части по длине балки, м									Среднее значение
		В торцевой части	0,5	1,0	1,5	1,75	1,5	1,0	0,5	В торцевой части	
Древесина современной сосны (несущая деревянная балка сечением 200×200 мм, длиной 3,5 м). Время воспламенения 5 мин 20 с	Глубина обугливания, мм	17	17	16	15	15	15	16	16	17	15
	Скорость обугливания, мм/мин	0,69	0,69	0,64	0,6	0,6	0,6	0,64	0,64	0,69	0,6
Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца, Брянская обл. (1865 г.) (несущая деревянная балка сечением 200×200 мм, длиной 3,5 м). Время воспламенения 6 мин 40 с	Глубина обугливания, мм	27	27	25	26	26	26	26	27	28	26
	Скорость обугливания, мм/мин	1,11	1,11	1,03	1,1	1,1	1,1	1,1	1,11	1,2	1,1

менной древесины сопоставимы со значениями данного показателя, представленными в отечественной и зарубежной нормативной и научной литературе [10–14]. Важным является то, что расхождение результатов измерений скорости обугливания в маломасштабной огневой печи и крупномасштабной установке составляет не более 15 %, что позволяет предсказывать значения параметров обугливания при испытаниях на небольших образцах в условиях одностороннего нагрева.

Исследованиями установлено, что с увеличением срока эксплуатации деревянных конструкций до 150 лет наблюдается повышение устойчивости к воспламенению в 1,3 раза, что подтверждает высказанное предположение о более раннем начале процесса обугливания и формировании специфического угольного слоя с упорядоченной структурой. За время испытаний 30 мин предельное состояние деревянных конструкций по несущей способности не наступило.

Для следующей серии испытаний основной задачей было нахождение предела огнестойкости деревянных конструкций сечением 180×180 мм и длиной 2,5 м. Балки нагружались в центре испытательной нагрузкой массой 100 кг. Два образца деревянных балок (первый — балка современная; второй — балка со сроком эксплуатации 150 лет) одновременно подвергались воздействию стандартного температурного режима пожара. На рис. 7 представлены фрагменты деревянных балок под нагрузкой во время огневых испытаний.

В результате наблюдений было установлено, что для деревянной балки с длительным сроком эксплуатации через 25 мин с начала огневых испытаний прогиб конструкции в центральной части составил 10 %, а через 32 мин — 15 %. Обрушение балки (предел огнестойкости конструкции по потере несущей способности) произошло на 37-й минуте.

Для современной балки прогиб конструкции в центральной части составил 15 % только на 74-й минуте. Предел огнестойкости данной конструкции по потере несущей способности наступил на 81-й минуте. Значительное снижение предела огнестойкости деревянных конструкций с увеличением срока их эксплуатации до 150 лет (в 2,2 раза) обусловлено повышением скорости обугливания конструкций, снижением температурных показателей процесса обугливания и потерей первоначальных механических характеристик древесины, а также повышении

ем окислительной и теплотворной способности образующегося угольного слоя.

Заключение

В статье представлены результаты исследования огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации. Показано, что с увеличением срока эксплуатации деревянных конструкций до 150 лет повышаются плотность и физико-механические характеристики древесины. Однако при температурном воздействии подобные конструкции теряют свои первоначальные прочностные свойства уже при температуре 80 °С.

Установлено значительное влияние временного фактора на скорость обугливания деревянных конструкций. Так, для деревянной балки со сроком эксплуатации 150 лет скорость обугливания повышается в 1,8 раза по сравнению с современной конструкцией из древесины в условиях стандартных огневых испытаний. Показано, что начало процесса обугливания деревянных конструкций с увеличением срока эксплуатации смещается в область более низких температур. Специфические свойства и структура угольных слоев способствуют снижению скорости потери массы на основном участке термического разложения и повышению устойчивости к воспламенению. Однако при дальнейшем возрастании температуры для подобных угольных слоев характерна высокая окислительная и теплотворная способность, склонность к активному выгоранию и беспламенному (тлеющему) горению.

Расхождение результатов измерений скорости обугливания в экспериментальной маломасштабной огневой печи и крупномасштабной установке составляет не более 15 %, что позволяет проводить прогнозную оценку параметров обугливания на небольших образцах в условиях одностороннего нагрева.

Изменения физико-химических и механических свойств древесины с длительным сроком эксплуатации, происходящие при воздействии высоких температур, приводят в целом к снижению предела огнестойкости деревянной конструкции по потере несущей способности в 2,2 раза.

По результатам проведенного исследования следует констатировать факт появления нового вида угрозы, связанной с особенностями поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара, а также с нестандартными количественными показателями процесса обугливания и огнестойкости этих конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук Л. М. Производство деревянных клееных конструкций. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : ООО РИФ “Стройматериалы”, 2005. — 336 с.

2. Варфоломеев Ю. А., Потуткин Г. Ф., Шаповалова Л. Г. Изменение свойств древесины при длительной эксплуатации (на примере памятников деревянного зодчества Архангельской обл.) // Деревообрабатывающая промышленность. — 1990. — № 10. — С. 28–30.
3. Варфоломеев А. Ю. Накопление повреждений в деревянных конструкциях при длительной эксплуатации в условиях биологической агрессии : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2010. — 157 с.
4. Стрельцов Д. Ю. Исследование несущей способности длительно эксплуатируемых деревянных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2003. — 168 с.
5. Покровская Е. Н. Прогнозирование долговечности древесины методом термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. — 2001. — Т. 10, № 6. — С. 31–32.
6. Тычино Н. А., Федосенко И. Г., Баранов А. В. Особенности строения и огнебиозащиты археологической древесины // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 1. — С. 19–25.
7. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. Fire behavior and fire protection in timber buildings. — Dordrecht : Springer, 2014. — 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5.
8. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
9. Харитонов В. С. Несущая способность изгибаемых клееных деревянных конструкций массивного сечения при тепловом воздействии : дис. ... канд. техн. наук. — М., 1992. — 190 с.
10. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. — Введ. 20.05.2011. — М. : ОАО «ЦПП», 2011.
11. BS EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: General — Structural fire design. — Brussels : CEN, 2004.
12. Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe / SP Report 2010:19. URL: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (дата обращения: 10.10.2015).
13. Гусев А. И., Пазникова С. Н., Кожевникова Н. С. Повышение огнестойкости деревянных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2006. — Т. 15, № 3. — С. 30–35.
14. White R. H., Nordheim E. V. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure // Fire Technology. — 1992. — Vol. 28, No. 1. — P. 5–30. DOI: 10.1007/bf01858049.

Материал поступил в редакцию 24 января 2016 г.

Для цитирования: Макишев Ж. К., Сивенков А. Б. Огнестойкость деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 34–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44.

English

FIRE RESISTANCE OF WOODEN STRUCTURES A LONG LIFE SPAN

MAKISHEV Zh. K., Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: makishev_jkkti@mail.ru)

SIVENKOV A. B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Academic Secretary, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: sivenkov01@mail.ru)

ABSTRACT

Within the latest decades, the research community has been focused on changes that may take place in qualitative characteristics of wood after long-term use of wooden structures used in buildings and structures. These are research papers by such scientists, as Varfolomeev Yu. A., Gusev B. P., Kesküllä T. E., Kisternaya M. V., Okamoto K., Pishchik I. I., Terentyev V. Ya., Fefilov V. V., Fukada E., Shapovalova L. G. and others. Such papers have shown major impacts produced by long-term natural ageing upon physicochemical, mechanical and other properties of wood due to structural and chemical transformations taking place in the wood.

Today, impact produced by long-term natural ageing of wood upon its fire hazard rates continues to be under-investigated. As shown by analysis of conflagration accidents that have taken place,

facilities having long useful-life and containing wooden structures behave unusually when exposed to high temperatures. Temperatures abnormally high, rapid propagation of fire and high-rate thermal damage to structures affected are most typical for such conflagrations. Non-standard behavior of long useful-life wooden structures in case of conflagrations and their fire hazard have been dealt with in research papers by such scientists as Aseeva R. M., Naganovskiy Yu. K., Pokrovskaya E. N., Serkov B. B. and Sivenkov A. B. In such papers, their authors have provided evidence of high-rate combustion hazard wooden structures acquire due to their long-term natural ageing. However, effects produced by long-term use of wooden structures used in buildings and structures upon their fire resistance continue to be poorly understood, and approaches best fit for making their fire-safe are still in need of investigation. Lack of scientific research in this area and the actually neglectful attitude to fire safety regulations and references system, as applicable to such factor as wooden structures' terms of use, provide a paramount importance to findings made by the study.

The principal purpose of this study was investigation into the impact of their long-term use upon fire resistance of wooden structures (WS) and upon their carbonization specifics combined with loss of WS sustaining capability in case of a conflagration.

It was the first time that investigation was ever made into behavior displayed by long useful-life wooden structures when exposed to a conflagration. It has been shown that time is a major factor contributing into carbonization rapidity (in the course of the use, such carbonization rapidity grows 2-fold on the average) and heating extent across the thickness of wooden structure affected. It has also been shown that wooden structures used for 150 years have higher wood density rates and physico-chemical properties. However, high temperatures cause loss, by such structures, of their initial durability rates, even when temperature is 80 °C only.

It has been shown that carbonization sets on at lower temperatures in wooden structures that have been longer in use; investigation has been made into properties and structure of wooden structure coal layers and their oxidizing power. It has been found that specific properties and structure of coal layer produced in any wood long-advanced in its natural ageing make such wood more fire-resistant. However, this is combined with high-rate cokes oxidizing power and heat output; high-rate thermal damage to the wood structures is also evident.

Interrelation has also been shown between findings obtained by thermal analysis method (TG, DTG and DSC) and carbonization extent, which is the principal process accompanying loss of their sustaining capacity by wooden structures. Such interrelation allows making estimations for fire resistance in long useful-life wooden structures usable in buildings and structures.

Carbonization rates obtained for various temperature ranges, and also temperature and time, when carbonization usually sets on, may be used in calculation methods applicable to estimations of the highest wooden-structure fire resistance rates. Estimations for the highest fire resistance rates of long useful-life wooden structures may be obtained for the existing buildings and structures and for those under reconstruction. Findings of the studies are proposed for use in Russian and foreign regulatory documents and in future, within studies of behavior displayed by wooden structures in case of a conflagration.

Findings so obtained allow improvement of safety for humans in long useful-life buildings and structures, and also improvement of safety for fire-fighting teams and successfulness of their efforts in fire extinguishing at such facilities.

Keywords: wood; wooden structures; useful life; pyrolysis; mechanical resistance; fire resistance; carbonization.

REFERENCES

1. Kovalchuk L. M. *Proizvodstvo derevyannykh kleynykh konstruktsey*. 3-e izd. [Production of wooden glued structures. 3rd ed.]. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2005. 336 p.
2. Varfolomeev Yu. A., Potutkin G. F., Shapovalova L. G. *Izmeneniye svoystv drevesiny pri dlitelnoy ekspluatatsii (na primere pamyatnikov derevyannogo zodchestva Arkhangel'skoy obl.)* [The change in wood properties during long-term operation (on the example of monuments of wooden architecture of the Arkhangelsk region)]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' — Woodworking Industry*, 1990, no. 10, pp. 28–30.

3. Varfolomeev A. Yu. *Nakopleniye povrezhdeniy v derevyannykh konstruktsiyakh pri dlitelnoy ekspluatatsii v usloviyakh biologicheskoy agressii*. Dis. kand. tekhn. nauk [Damage accumulation in wood structures during long-term operation in the conditions biological aggression. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2010. 157 p.
4. Streltsov D. Yu. *Issledovaniye nesushchey sposobnosti dlitelno ekspluatiruyemykh derevyannykh konstruktсий*. Dis. kand. tekhn. nauk [Study of bearing capacity long maintained wooden structures. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2003. 168 p.
5. Pokrovskaya E. N. Prognozirovaniye dolgovechnosti drevesiny metodom termicheskogo analiza [Forecasting the durability of wood by thermal analysis]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2001, vol. 10, no. 6, pp. 31–32.
6. Tychino N. A., Fedosenko I. G., Baranov A. V. Osobennosti stroyeniya i ognebiozashchity arkhеologicheskoy drevesiny [Features of the structure and onebusaway archaeological wood]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007. vol. 16, no. 1, pp. 19–25.
7. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Dordrecht, Springer, 2014. 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5.
8. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye drevesiny i yeye pozharоopasnyye svoystva* [Burning wood and its fire behavior]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p.
9. Kharitonov V. S. *Nesushchaya sposobnost izgibayemykh kleyenykh derevyannykh konstruktсий massivnogo secheniya pri teplovom vozdeystvii*. Dis. kand. tekhn. nauk [Bearing capacity of bent laminated wood structures of solid cross-section during thermal impact. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 1992. 190 p.
10. *Set of rules 64.13330.2011. Timber structures*. Moscow, Center of Design Production in Construction Publ., 2011 (in Russian).
11. *BS EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: Structural fire design*. Brussels, CEN, 2004.
12. *Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe, SP Report 2010:19*. Available at: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (Accessed 10 October 2015).
13. Gusev A. I., Paznikova S. N., Kozhevnikova N. S. Povysheniye ognestoykosti derevyannykh konstruktсий [Increase fire resistance of wooden structures]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2006. vol. 15, no. 3, pp. 30–35.
14. White R. H., Nordheim E. V. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology*, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 5–30. DOI: 10.1007/bf01858049.

For citation: Makishev Zh. K., Sivenkov A. B. Ognestoykost derevyannykh konstruktсий s dlitelnym srokom ekspluatatsii [Fire resistance of wooden structures a long life span]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 34–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44.