

Ж.К. Макишев

(Кокшетауский технический институт КЧС МВД Республики Казахстан;
e-mail: makishev_jkkti@mail.ru)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБУГЛИВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Представлены результаты исследования параметров обугливания деревянных конструкций длительного срока эксплуатации в условиях воздействия различных температурных режимов. Установлено существенное влияние продолжительности эксплуатации деревянных конструкций на скорости их обугливания. Изучены физические свойства, а также особенности структуры угольных слоёв древесины продолжительного естественного старения.

Ключевые слова: деревянные конструкции, огнестойкость, обугливание, срок эксплуатации.

Zh.K. Makishev

PECULIARITIES OF THE PROCESS OF CHARRING WOOD CONSTRUCTIONS LONG-TERM OPERATION

The results obtained in experimental studies of charring for long-life wooden constructions under various temperature conditions is given. The essential effect of wooden constructions running time on the charring rate is found. Studied physical properties, as well as features of the structure of coal layers of wood long lasting natural aging.

Key words: wooden constructions, fire resistance, charring, lifetime.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 14 сентября 2015 г.

Введение

В мировой строительной индустрии древесина находит широкое применение в качестве конструкционного материала для зданий и сооружений различного функционального назначения, в том числе для строительства жилых, общественных, производственных, сельскохозяйственных, животноводческих и складских объектов. Яркими примерами таких объектов являются: конькобежный центр в Крылатском (Москва), манеж "Подмосковье" (Московская область), Центральный киноконцертный зал "Казахстан" (Астана, Республика Казахстан), музейный комплекс "Резиденция Абылай Хана" (Петропавловск, Республика Казахстан), торговый комплекс "Metropol Parasol" (Севилья, Испания), футуристическая библиотека (Норвегия) и ряд других.

Долговечность деревянных конструкций при правильной их эксплуатации и своевременных текущих ремонтах может достигать нескольких сотен лет. Уникальными примерами долговечности деревянных сооружений служат Преображенский храм на острове Кижы (1714 г.), Михаило-Архангельский собор (г. Уральск, Республика Казахстан) (1750 г.), церковь святых Архангелов (д. Сурдешти, Румыния) (1766 г.) и многие другие памятники деревянного зодчества.

Одним из главных требований, предъявляемых к конструкциям из цельной древесины и **деревянными клеёными конструкциям (ДКК)** 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 временным показателем – **пределом огнестойкости конструкции**.

Основные положения технического регулирования в области пожарной безопасности в Российской Федерации, а также общие требования пожарной безопасности к зданиям и сооружениям, в том числе с применением деревянных конструкций, приведены в Федеральном законе № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности". Специально для зданий и сооружений из цельной древесины и ДКК в 2011 году введен в действие свод правил по проектированию и расчёту конструкций жилых, общественных, промышленных и других деревянных строительных объектов [1]. Методы проектирования и расчёта ДКК, конструкций из цельной древесины, нормативные и расчётные значения прочности деревянных конструкций при разных видах нагружения нашли также отражение в стандарте организаций [2].

В Республике Казахстан вопросы нормативного применения несущих и ограждающих деревянных конструкций регламентируются такими государственными техническими регламентами как "Общие требования к пожарной безопасности", "Требования к безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий", а также "Требования к безопасности деревянных конструкций".

Важную роль для оценки пожаробезопасности деревянных конструкций играют расчётные и экспериментальные методы. Экспериментально предел огнестойкости деревянных конструкций определяется по методам, установленным ГОСТ 30247.0 и ГОСТ 30247.1. По характеристикам печных устройств и используемой стандартной температурной зависимости развития пожара указанные ГОСТы подобны мировым стандартам ISO 834 и ASTM E-119.

Вопрос о скорости обугливания конструкций из цельной древесины, ДКК и других видов продукции на основе древесины при пожаре занимает центральное место в исследованиях огнестойкости деревянных зданий и сооружений [3-5]. Это не удивительно, так как предел огнестойкости конструкций определяют с учётом суммарного времени от начала теплового воздействия на деревянный элемент конструкции до начала его обугливания и времени от начала обугливания до наступления предельного, критического состояния. К факторам, оказывающим влияние на скорость обугливания деревянных конструкций, можно отнести разновидность и породу древесины, вид древесины (клеёная или цельная), наличие элементов усиления, геометрические размеры и конфигурацию сечения конструкции, тип несущей конструкции, условия огневого воздействия (пожара) [6].

В нормативной практике Российской Федерации и Республики Казахстан скорость обугливания цельных деревянных конструкций из древесины хвойных пород принимается $0,7 \text{ мм/мин}$. В европейских нормативных документах скорость обугливания для различных видов деревянных конструкций изменяется от $0,5$ до $1,0 \text{ мм/мин}$ [7]. В ряде европейских стран приняты стандарты, устанавливающие среднюю скорость обугливания для того или иного типа деревянных конструкций [8].

В последние десятилетия большое внимание учёных было обращено на изменения качественных свойств древесины в результате продолжительной эксплуатации деревянных конструкций зданий и сооружений. Так в работах [6, 9, 10] было показано значительное влияние длительного естественного старения на физико-химические, механические и пожароопасные свойства древесины в результате трансформации её структуры и химических превращений, происходящих в древесном материале. Актуальным, но фактически не изученным, направлением научных исследований является вопрос влияния длительного срока эксплуатации на огнестойкость деревянных конструкций, а также изучение особенностей процесса обугливания, сопровождающего потерю несущей способности ДКК в условиях пожара. Представлялось важным выяснить не только как количественно изменяются параметры обугливания деревянных конструкций с увеличением срока их службы, но и как оказывает влияние длительная эксплуатация на особенности формирования обугленного слоя, его физическую структуру.

Результаты исследования и обсуждение

Для проведения исследований были отобраны образцы элементов деревянных конструкций, неподверженных гниению, на следующих объектах продолжительного срока эксплуатации:

- нежилой дом в с. Жанажол (Северо-Казахстанская область, республика Казахстан) (срок эксплуатации 63 года) – элементы стропильной части дома;
- нежилой дом в с. Кайынды (Костанайская область, республика Казахстан) (срок эксплуатации 87 лет) – элементы стропильной части дома;
- театр кукол "Гулливер" в г. Курган, ул. Советская, д. 104 – элементы деревянного перекрытия между подвальным и 1-м этажом здания;
- церковь Николая Чудотворца в Брянской области (1865 год), пошедшая из-за ветхости под снос – деревянные несущие конструкции (балки и стойки).

Для оценки параметров обугливания элементов деревянных конструкций была использована стандартная установка по определению параметров воспламенения строительных материалов по ГОСТ 30402-96, а также экспериментальная маломасштабная огневая печь для испытаний элементов деревянных конструкций при воздействии стандартного температурного режима пожара. При испытаниях на установке по определению воспламеняемости, в отличие от стандартной методики, образцы древесины подвергались воздействию лучистого теплового потока мощностью 20 кВт/м^2 без воздействия источника пламени в течение 20 мин .

При огневых испытаниях в режиме стандартного температурного режима пожара при одностороннем нагреве на маломасштабной установке продолжительность испытаний также составляла 20 минут. Образец крепился с использованием специального держателя в виде рамки.

Для подготовки маломасштабной огневой печи проводилась отладка огневой печи, которая включает в себя проверку температурного режима, создающегося в огневой камере. Для измерения температуры были использованы лепестковые термопары типа хромель-алюмель. Термопары подсоединялись к контрольно-измерительному прибору "Элемер", подключённому к персональному компьютеру для регистрации показаний.

Испытания проводились для каждой серии на 3-х образцах, имеющих форму квадрата, со стороной 150 мм. Толщина образцов составляла 35 мм.

В табл. 1 представлены результаты оценки параметров обугливания (толщина угольного слоя (δ_k), скорость обугливания (v), плотность угольного остатка (ρ_k) элементов деревянных конструкций различного срока эксплуатации).

Результаты, представленные в табл. 1 свидетельствуют о том, что при увеличении продолжительности эксплуатации деревянных конструкций наблюдается активная интенсификация обугливания. Так в условиях стандартного температурного воздействия для деревянных конструкций сроком эксплуатации 150 лет (церковь Николая Чудотворца) скорость обугливания, по сравнению со скоростью обугливания современной древесиной, повышается в 1,7 раза. Для всех исследуемых образцов наблюдается общая тенденция: при увеличении продолжительности срока эксплуатации деревянных конструкций происходит повышение плотности древесины, что, очевидно, способствует интенсивному прогреву конструкции по толщине.

Кроме этого, можно свидетельствовать о том, что весомый вклад в ускорение данного процесса вносит изменение химического состава древесины. Это подтверждается ранее проведенными исследованиями влияния химического состава древесины длительного естественного старения на параметры её обугливания [6].

Интересно отметить, что 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 свойствами, по сравнению с современной древесиной. Образование подобных угольных структур, наряду с уменьшением количества легколетучих компонентов в древесине продолжительного естественного старения, приводит к повышению устойчивости материала к воспламеняемости. Для всех исследуемых образцов древесины длительного срока эксплуатации повышается время возникновения пламенного горения (τ_0) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты оценки параметров обугливания элементов деревянных конструкций

№ обр.	Наименование образца	* ρ , кг/м ³	δ_k , мм	v , мм/мин.	ρ_k , кг/м ³	τ_0 , мин.
Плотность внешнего теплового потока 20 кВт/м ² , установка по ГОСТ 30402-96. Продолжительность испытаний 20 мин.						
1	Древесина сосны современной	452	15	0,75	290	4 мин. 20 с
2	Древесина сосны, нежилой дом (1952 год), Республика Казахстан, с. Жанажол (Северо-Казахстанская область)	477	19	0,95	278	4 мин. 45 с
3	Древесина сосны, нежилой дом (1928 год), Республика Казахстан, с. Кайынды (Костанайская область)	546	20	1,0	256	5 мин. 30 с
4	Древесина сосны (1890 год), элементы деревянного перекрытия, театр кукол "Гулливёр", г. Курган	588	24	1,20	244	6 мин. 15 с
5	Древесина сосны (1865 год), церковь Николая Чудотворца, Брянская область	643	27	1,35	238	7 мин. 40 с
Маломасштабная огневая печь (условия – стандартный температурный режим пожара). Продолжительность испытаний 20 мин.						
1	Древесина сосны современной	452	19	0,95	268	3 мин. 44 с
2	Древесина сосны, нежилой дом (1952 год), Республика Казахстан, с. Жанажол (Северо-Казахстанская область)	477	23	1,15	254	4 мин. 40 с
3	Древесина сосны, нежилой дом (1928 год), Республика Казахстан, с. Кайынды (Костанайская область)	546	25	1,25	237	4 мин. 55 с
4	Древесина сосны (1890 год), элементы деревянного перекрытия, театр кукол "Гулливёр", г. Курган	588	27	1,35	224	5 мин. 25 с
5	Древесина сосны (1865 год), церковь Николая Чудотворца, Брянская область	643	32	1,60	215	5 мин. 35 с

* – плотность образцов древесины перед проведением огневых испытаний составляла 12 %

Снижение плотности угольного остатка и повышение устойчивости древесины к воспламенению в результате её продолжительной эксплуатации можно объяснить результатами изучения особенностей структуры образующегося угольного остатка.

Для исследования характеристик поверхностного угольного слоя был использован метод сорбции паров. Метод сорбции паров адсорбата (бензола) на поверхности угля использовался для расчёта характеристик его пористой структуры. Для исследований методом сорбции паров были соблюдены следующие условия. Адсорбент представлял собой угольный порошок мелкой фракции (0,3-0,5 мм) – поверхностный угольный слой образцов древесины, испытанных на маломасштабной установке в условиях стандартного температурного

режима пожара. Выбор бензола в качестве адсорбата объясняется тем, что это вещество имеет большое поверхностное натяжение и может смачивать поверхность капилляров древесины.

Кинетические кривые адсорбции образцов угольных остатков представлены на рис. 1, где видно, что максимальные значения привеса адсорбата имеют для угольного остатка древесины сосны со сроком эксплуатации 150 лет (26,76 %). Это фактически в 2 раза превышает значение привеса адсорбата для древесины современной (12,8 %). Для угольного остатка современной древесины характерно быстрое насыщение парами адсорбента на начальном этапе и дальнейшая стабилизация кривой. Полное насыщение образцов парами бензола произошло за 6 суток.

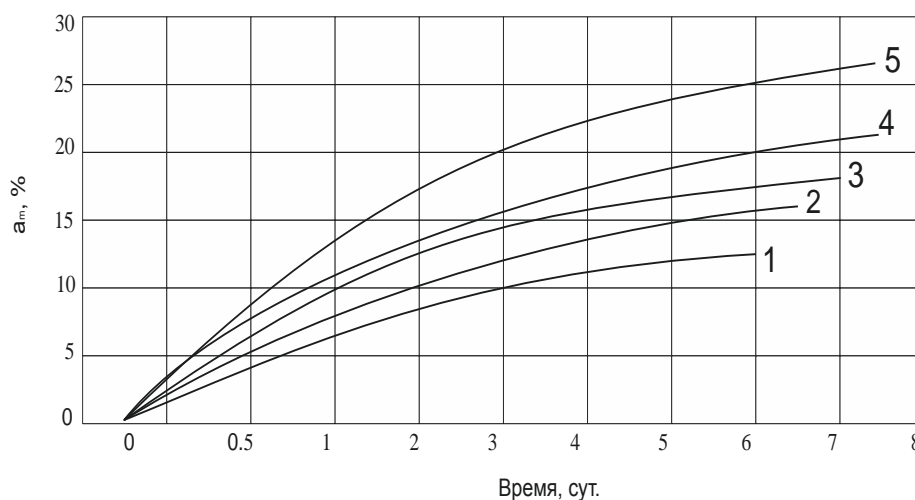


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции паров бензола для угольных остатков древесины сосны различного срока эксплуатации:
1 – современная древесина; 2 – древесина сосны, нежилой дом (1952 год), республика Казахстан, с. Жанажол (Северо-Казахстанская область);
3 – древесина сосны, нежилой дом (1928 год), республика Казахстан, с. Кайынды (Костанайская область); 4 – древесина сосны (1890 год), элементы деревянного перекрытия, театр кукол "Гулливер"; 5 – древесина сосны (1865 год), церковь Николая Чудотворца, Брянская область.

Для угольного остатка древесины длительного естественного старения характерны медленное насыщение на начальном этапе (2-3 часа), дальнейшая интенсификация процесса и равномерное насыщение. Как показывают результаты испытаний, период поглощения паров бензола для древесины естественного старения имеет более длительный период по сравнению с древесиной современной. Полное насыщение образцов парами бензола произошло на 8-е сутки. Это свидетельствует о более развитой структуре угольного слоя для древесины длительного старения.

Для объяснения полученных результатов были рассчитаны характеристики пористой структуры угольных остатков: суммарный объём пор (V_{Σ}), средний радиус пор (d_{cp}) и удельная поверхность угольных слоёв ($S_{уд}$).

Суммарный объём пор определяется по формуле:

$$V_{\Sigma} = \frac{\Delta g}{g\rho_s} (\text{см}^3/\text{г}),$$

где Δg – привес адсорбента за счёт поглощения бензола, г;

g – навеска адсорбента, г;

ρ_s – плотность бензола при 20 °С (0,876 г/см³).

Удельная поверхность определяется по формуле:

$$S_{уд} = a_m N_A \omega_m 10^{-20} (\text{м}^2/\text{г}),$$

где a_m – привес (моль/г);

N_A – число Авогадро (6,022 141 79(30) · 10²³ моль⁻¹);

ω_m – площадь площадки занимаемой одной молекулой (49 Å²).

Средний радиус пор определяется по формуле (3):

$$d_{cp} = 2 \cdot 10^4 \frac{V_{\Sigma}}{\rho}.$$

Результаты расчётов характеристик структуры угольных слоёв приведены в табл. 2 (наименование образцов представлено в табл. 1).

Таблица 2

Характеристики пористой структуры угольных слоёв

№ образца	адсорбат – бензол			
	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

Результаты, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что с увеличением срока эксплуатации наблюдается уменьшение диаметра пор, увеличение суммарного объёма пор и удельной поверхности, а также увеличение поглощающей способности. Длительная эксплуатация деревянных конструкций приводит к образованию угольного остатка с мелкопористой структурой, что предполагает более низкую теплопроводность. Однако, учитывая более высокие значения удельной площади и удельного объёма угольных структур, можно прогнозировать повышенную их окисляемость и большую предрасположенность к тлеющему (беспламенному) горению.

Заключение

По результатам исследования установлены параметры обугливания элементов деревянных конструкций различного срока эксплуатации. Установлено, что при долговременной эксплуатации деревянных конструкций происходит значительное увеличение параметров обугливания. Так, для современных конструкций из древесины сосны скорость обугливания в условиях стандартного температурного режима пожара составила 0,95 мм/мин, а при продолжительной эксплуатации объекта (150 лет) скорость обугливания увеличилась до 1,6 мм/мин.

Наибольший эффект в изменении морфологической структуры древесины наблюдается при рассмотрении образцов древесины со сроком эксплуатации более 100 лет. Это может быть связано как с изменениями в химическом составе древесины в результате её длительной эксплуатации, так и со значительной трансформацией структуры древесного материала.

Кроме этого, для древесины длительного старения установлено активное образование угольного остатка с более развитой пористой структурой, по сравнению с современной древесиной. Это обстоятельство сказывается на повышении устойчивости образцов древесины длительного естественного старения к воспламеняемости, однако, вместе с этим наблюдается интенсификация процесса обугливания, что негативно должно сказаться на огнестойкости деревянных конструкций.

Литература

1. *СП* 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
2. *СТО* 36554501-002-2006. Деревянные клеёные и цельнодеревянные конструкции.
3. *White R.H., Nordheim E.V.* Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure // *Fire Technology*. Vol. 28. № 1. 1992. Pp. 5-30.
4. *Vytenis Babrauskas.* Wood char depth: interpretation in fire investigations // *International Symposium on Fire Investigation*. Fire Service College, Moreton-in-Marsh, United Kingdom. 28 June 2004. 12 p.
5. *Харитонов В.С., Хмелидзе Т.П.* Поведение клеёных деревянных балок в условиях стандартного пожара // Сб. "Огнестойкость строительных конструкций и обеспечение пожарной безопасности людей и материальных ценностей". М.: ВНИИПО МВД СССР, 1989. С. 40-47.
6. *Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B.* Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings // *Springer Series in Wood Science*. Germany: Springer, 2014. 280 p.
7. *EN* 1995-1-2-2004. Eurocode 5-Design of timber structures, Part 1-2: General-Structural fire design.
8. *Гусев А.И., Пазникова С.Н., Кожевникова Н.С.* Повышение огнестойкости деревянных конструкций // *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т. 15. № 3. С. 30-35.
9. *Варфоломеев Ю.А., Потуткин Г.Ф., Шановалова Л.Г.* Изменение свойств древесины при длительной эксплуатации (на примере памятников деревянного зодчества Архангельской обл.) // *Деревообрабатывающая промышленность*. № 10. 1990. С. 28-30.
10. *Покровская Е.Н.* Химико-физические основы увеличения долговечности древесины. Сохранение памятников деревянного зодчества с помощью элементоорганических соединений: монография. М.: изд-во АСВ, 2003. 104 с.