

*Е.А. Анохин<sup>1</sup>, Ж.К. Макишев<sup>2</sup>, А.Б. Сивенков<sup>1</sup>*

*(<sup>1</sup>Академия ГПС МЧС России; <sup>2</sup>Кокшетауский технический институт  
КЧС МВД Республики Казахстан, e-mail: makishev\_jkkti@mail.ru)*

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КАРБОНИЗОВАННОГО СЛОЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ИХ ОГНЕСТОЙКОСТЬ**

*Установлено, что свойства и структура карбонизованного слоя деревянных конструкций длительного срока эксплуатации способствуют менее интенсивному прогреву конструкций по толщине и повышению устойчивости древесины к воспламеняемости.*

*Ключевые слова: деревянные конструкции, карбонизованный слой, огнестойкость.*

*E.A. Anokhin, Zh.K. Makishev, A.B. Sivenkov*

## **THE EFFECT OF THE STRUCTURE OF CARBONIZED LAYER OF WOODEN STRUCTURES LONGER LIFE ON THE THEIR FIRE RESISTANCE**

*It is established that the structure and properties of carbonized layers of wooden structures a long life span contribute less intensive heating of the structure by the thickness and resiliency of the wood to flammability.*

*Key words: wooden constructions, carbonized layer, fire resistance.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 11 декабря 2015 г.

### **Введение**

Анализ происшедших пожаров свидетельствует об особенностях состояния объектов продолжительного срока эксплуатации с **деревянными конструкциями (ДК)** в условиях воздействия высоких температур или пожара. Такие пожары характеризуются аномально высокой температурой, быстрым развитием пожара и высокой степенью термического повреждения конструкций.

Примерами деревянных объектов со сроком эксплуатации 100 и более лет, утраченных в результате разрушительных пожаров, являются: церковь Богоявления (Воскресенский монастырь Нового Иерусалима (Московская область, 1673 год), церковь Спаса на сваях (Ипатьевский монастырь, г. Кострома, 1713 год), церковь Покрова Пресвятой Богородицы (Узденский район, Минская область, Беларусь, 1898 год), дом тканей "Кызыл-Тан" (г. Алматы, Казахстан, 1912 год) и десятки других исторических объектов.

Изучению особенностей состояния деревянных конструкций длительного срока эксплуатации в условиях пожара и их горючести посвящены немногочисленные научные работы [1-4], в которых были приведены результаты, свидетельствующие о возможном повышении горючести ДК с увеличением срока их эксплуатации.

Вместе с тем, одним из главных требований, которые предъявляются к ограждающим и несущим ДК, является обеспечение нормативных показателей огнестойкости. Снижение несущей способности элементов и узлов ДК, выраженной пределом огнестойкости, обусловлено изменением в условиях пожара прочностных и геометрических характеристик сечений конструкции. Уменьшение размеров рабочего сечения конструкции в результате воздействия высоких температур или пожара происходит вследствие обугливания конструкции. Поэтому не случайно в последние десятилетия большое внимание было уделено изучению особенностей данного процесса [5-8]. Несмотря на это, вопрос влияния продолжительности эксплуатации деревянных конструкций на процесс обугливания древесины и структуру карбонизованного слоя остаётся фактически не изученным.

В настоящей статье представляется важным выяснить, не только какое влияние оказывает продолжительное естественное старение древесины на структуру и свойства карбонизованного остатка, но и как эти структурные изменения влияют на огнестойкость деревянных конструкций.

### **Объекты и методы исследования**

Для исследования были взяты образцы древесины сосны современной (Архангельская область) и древесины на объекте с деревянными несущими конструкциями (балки и стойки из древесины сосны) длительного срока эксплуатации: церковь Николая Чудотворца в Брянской области (1865 год), пошедшая из-за ветхости под снос (рис. 1).



**Рис. 1.** Общий вид несущей деревянной балки и опорной стойки в церкви Николая Чудотворца (Брянская область), 1865 год постройки

Для оценки параметров обугливания была использована лабораторная огневая установка с воздействием на образцы стандартного температурного режима пожара, а также огневая печь для оценки огнестойкости строительных конструкций в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94.

Для изучения структуры карбонизованных слоев был использован метод сорбции паров бензола и метод электронной микроскопии.

## Результаты исследования и обсуждение

При изучении параметров обугливания исследуемых образцов испытания на лабораторной установке проводились для каждой серии на 3-х образцах, имеющих форму квадрата, со стороной 150 мм. Толщина образцов составляла 40 мм.

В табл. 1 представлены результаты оценки параметров обугливания (толщина угольного слоя ( $\delta_k$ ), скорость обугливания ( $v$ ), плотность угольного остатка ( $\rho_k$ ), время начала пламенного горения ( $\tau_0$ ) исследуемых образцов древесины с использованием лабораторной огневой установки в условиях стандартного температурного режима пожара.

Таблица 1

### Характеристики обугливания исследуемых образцов древесины

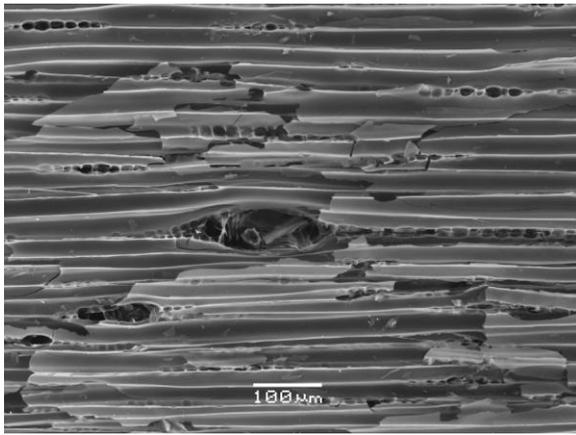
№ обр.	Наименование образца	* $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta_k$ , мм	$v$ , мм/мин	$\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau_0$ , с
1	Древесина сосны современной (Архангельская область)	452	16,5	0,55	252	224 с.
2	Древесина сосны (1865 год), церковь Николая Чудотворца, Брянская область	643	40	1,33	220	335 с.

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

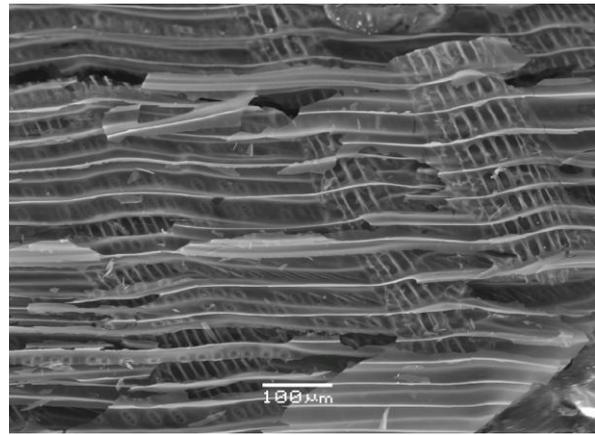
Результаты, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что при увеличении продолжительности эксплуатации деревянных конструкций наблюдается активная интенсификация процесса обугливания. Так в условиях стандартного температурного воздействия для деревянных конструкций сроком эксплуатации 150 лет скорость обугливания, по сравнению с современной древесиной, повышается в 2,4 раза. При этом плотность образующегося угольного остатка снижается, а устойчивость к воспламенению образцов древесины длительного срока эксплуатации возрастает. Это может свидетельствовать о значительном изменении структуры карбонизованного слоя для древесины длительного естественного старения.

Оценка качественных изменений структуры карбонизованного остатка выполнена на сканирующем цифровом электронном микроскопе *JSM-5610LV* (Япония) в отражённых электронах (*BSE COMPO*). На образцы древесины предварительно была напылена тонкая плёнка углерода для стекания электростатического заряда, возникающего при взаимодействии образца с пучком электронов. Съёмка изображений осуществлялась при увеличении поверхности от 500 до 1000 раз.

При рассмотрении поверхности угольных слоев (увеличение в 500 раз) можно сделать вывод о том, что для образцов современной древесины наблюдается образование пластинчатых структур, между которыми расположены поры неодинакового размера. Для карбонизованного слоя древесины длительного срока эксплуатации наблюдается переход от пластинчатой к более открытой структуре, в которой можно различить большое количество пор правильной формы (рис. 2).



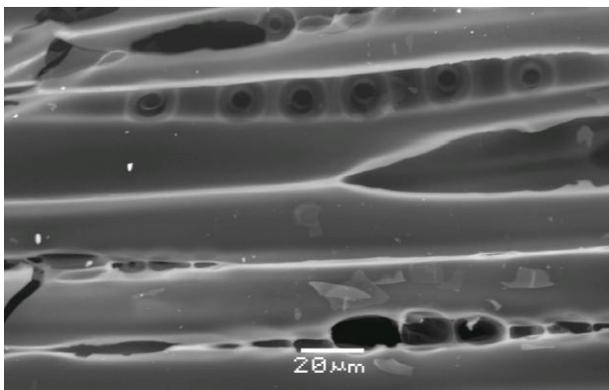
Образец 1



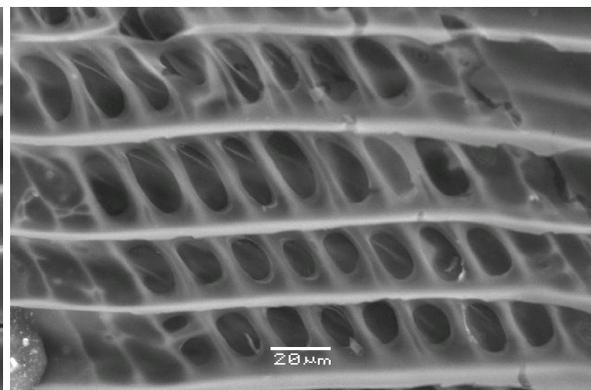
Образец 2

**Рис. 2.** Структура карбонизованного слоя образцов древесины после огневых испытаний на лабораторной установке (увеличение  $\times 500$  раз)

При увеличении изучаемой поверхности в 1000 раз для карбонизованного остатка современной древесины действительно можно наблюдать случайное и несимметричное расположение пор, а угольный слой древесины длительного срока эксплуатации приобретает упорядоченную "сотоподобную" структуру (рис. 3). Это свидетельствует о более развитой внутренней поверхности кокса.



Образец 1



Образец 2

**Рис. 3.** Структура карбонизованного слоя образцов древесины после огневых испытаний на лабораторной установке (увеличение  $\times 1000$  раз)

Для исследований характеристик структуры полученного карбонизованного слоя был использован метод сорбции паров бензола. Адсорбент представлял собой угольный порошок мелкой фракции (0,3-0,5 мм).

По результатам исследований была проведена расчётная оценка характеристик пористой структуры угольных слоёв: суммарный объём пор ( $V_{\Sigma}$ ), средний радиус пор ( $d_{cp}$ ) и удельная поверхность угольных слоев ( $S_{уд}$ ) (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристики структуры угольных слоёв**

№ обр.	Наименование образца	Наименование характеристик структуры угольного слоя			
		$a_m, \%$	$V_{\Sigma}, \text{см}^3/\text{г}$	$d_{cp}, \text{нм}$	$S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$
1	Древесина сосны современной (Архангельская область)	14,8	0,4726	25,03348	377,5744
2	Древесина сосны (1865 год), церковь Николая Чудотворца, Брянская область	26,76	0,5234	14,65459	1645,7461

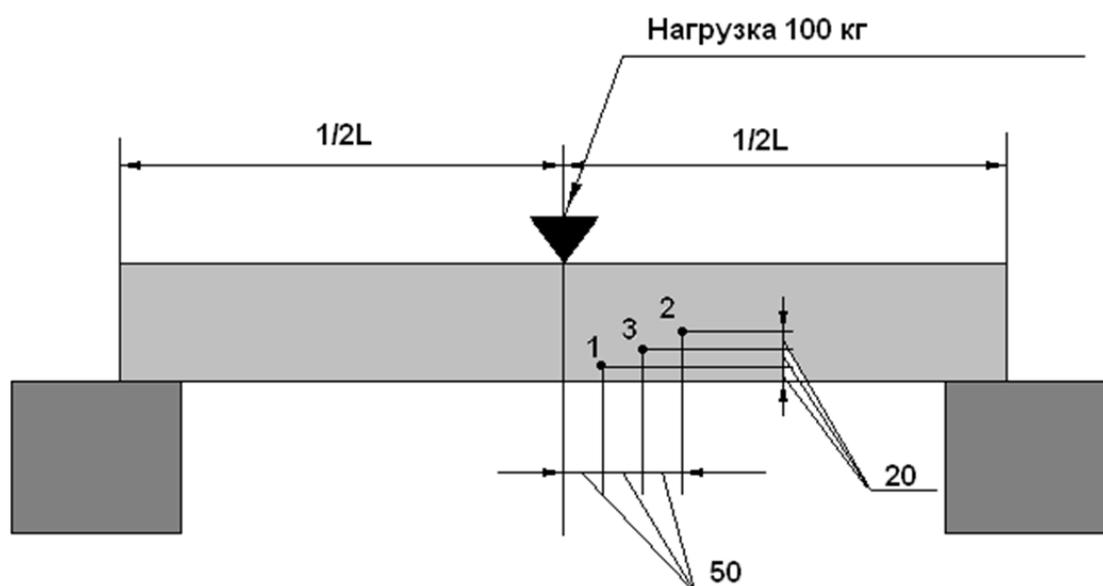
Максимальные значения привеса адсорбата имеются для карбонизованного остатка древесины сосны со сроком эксплуатации 150 лет (26,76 %). Это фактически в 2 раза превышает значение привеса адсорбата образцов углей для древесины современной (14,8 %). Для угольной структуры древесины естественного старения характерно увеличение удельной поверхности кокса и удельного объёма пор. При этом диаметр ячейки поры данного кокса значительно ниже, по сравнению с диаметром ячейки кокса современной древесины. Более развитая структура кокса, по всей видимости, будет способствовать снижению степени прогрева материала по толщине. Можно прогнозировать, что при повышении температуры структурные особенности угольного остатка приведут к его высокой окислительной способности и интенсивному термическому выгоранию.

По полученным данным прогрева образцов древесины на установке по определению воспламеняемости строительных материалов (ГОСТ 30402-96) были проведены расчёты теплофизических характеристик образующегося угольного остатка исследуемых образцов. Размеры образцов составляли 150×150 мм, толщиной 20 мм. Термопары были установлены непосредственно на поверхности образца и на расстоянии 10 мм от его внешней стороны. При сравнительном анализе значений коэффициентов теплопроводности можно сделать вывод, что продолжительность эксплуатации древесины оказывает значительное влияние на теплопроводность древесного материала при его горении. Интересно отметить, что для образующегося карбонизованного слоя древесины длительной эксплуатации значения коэффициентов теплопроводности ниже, чем для образцов современной древесины. Расчётная оценка коэффициента теплопроводности показала, что для угольного слоя современной древесины коэффициент теплопроводности составил 0,08 Вт/м·°К, а для древесины со сроком эксплуатации 150 лет – 0,05 Вт/м·°К.

С целью оценки влияния структурных особенностей карбонизованного слоя на огнестойкость деревянных конструкций, а также интенсивность прогрева в условиях стандартного температурного режима пожара были проведены огневые испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94.

На испытания были представлены следующие образцы: несущая балка из древесины сосны (Архангельская область, влажность древесины – 12,0 %, плотность древесины  $452 \text{ кг/м}^3$ ) и несущая балка из древесины сосны (Церковь Николая Чудотворца, Брянская область, 1865 год постройки, влажность древесины – 12,0 %, плотность древесины  $643 \text{ кг/м}^3$ ). Сечение деревянных конструкций составляло  $180 \times 180 \text{ мм}$ , длина –  $2500 \text{ мм}$ . Образцы в центре нагружались испытательной нагрузкой –  $100 \text{ кг}$ .

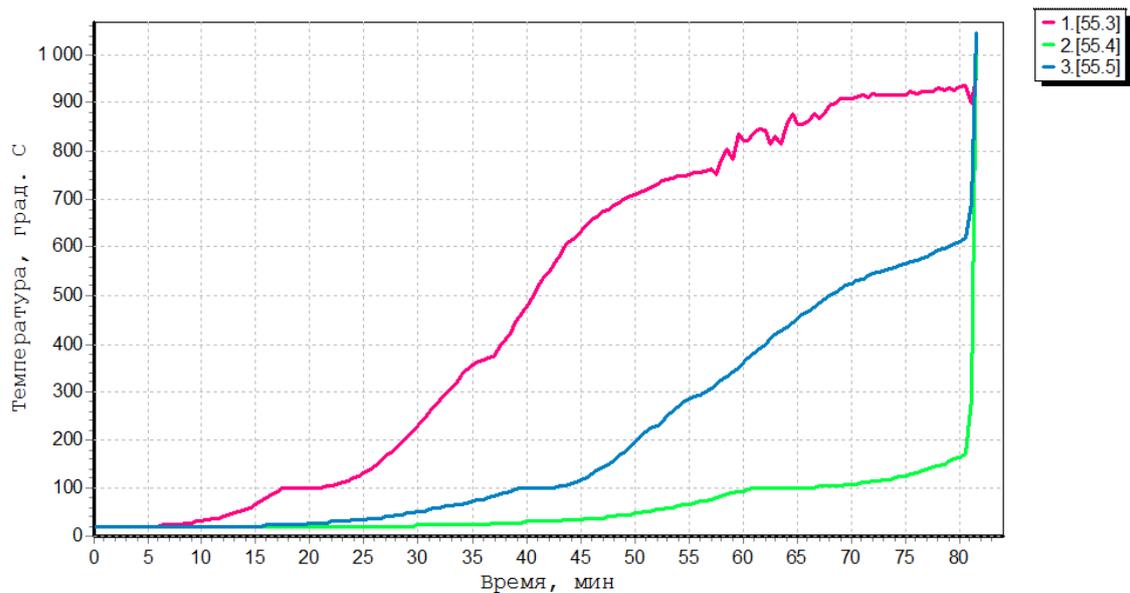
По результатам огневых испытаний проводилось определение температуры по толщине балки (размещение термоэлектрических преобразователей внутри образца представлено на рис. 4).



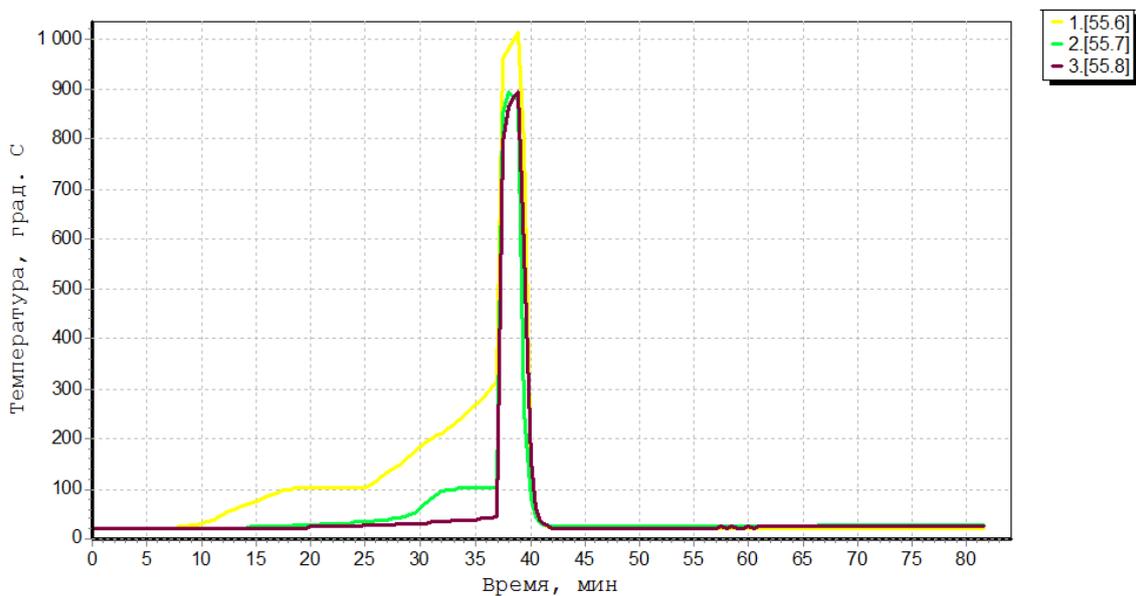
**Рис. 4.** Схема установки термоэлектрических преобразователей внутри образца деревянной балки

Представленные результаты по прогреву современных ДК (рис. 5, образец 1) отражают классическое состояние строительных конструкций из древесины в условиях воздействия стандартного температурного режима пожара. Протекание процессов утраты первоначальных механических характеристик и обугливания древесины наблюдаются при температуре, установленной в нормативных и справочных документах для 4-стороннего нагрева конструкции [9, 10].

Можно прогнозировать с достаточной точностью скорость обугливания –  $0,7 \text{ мм/мин.}$  для современных деревянных конструкций. При этом толщина слоя древесины, потерявшего первоначальные механические свойства, составляет  $7 \text{ мм}$ . Иная картина наблюдается для деревянных конструкций длительного естественного старения (150 лет эксплуатации) (рис. 5, образец 2). Скорость обугливания для этих ДК составляет  $1,2 \text{ мм/мин.}$ , а предсказанная температура начала обугливания –  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Образец 1



Образец 2

**Рис. 5.** Изменения температуры внутри исследуемых образцов деревянных балок во время огневых испытаний по ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94

Изменения температуры внутри образцов деревянных балок подтверждают ранее высказанное предположение об образовании угольного слоя, обладающего низким коэффициентом теплопроводности, для деревянных конструкций длительного срока эксплуатации (рис. 5).

Однако интенсификация процесса обугливания, повышение его окислительной и теплотворной способности в целом способствуют снижению огнестойкости деревянных конструкций с увеличением срока их эксплуатации. По результатам наблюдений было установлено, что для деревянной балки длительного срока эксплуатации через 25 минут огневых испытаний прогиб конструкции в центральной части составил 10 %, а на 32 минуте – 15 %. Обрушение балки (предел огнестойкости конструкции по потере несущей способности) произошло на 37 минуте.

Для современной балки прогиб конструкции в центральной части составил 15 % только на 74 минуте. Предел огнестойкости данной конструкции по потере несущей способности наступил на 81 минуте.

### **Заключение**

Исследовано влияние продолжительности эксплуатации на огнестойкость деревянных конструкций. Установлено значительное влияние временного фактора на скорость обугливания деревянных конструкций. Так для несущей деревянной балки со сроком эксплуатации 150 лет скорость обугливания повышается в 1,8 раза, по сравнению с современными конструкциями из древесины хвойных пород в условиях огневых испытаний по ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94.

Специфические свойства и структура карбонизованного слоя деревянных конструкций длительного срока эксплуатации способствуют повышению устойчивости их к воспламеняемости. При продолжительной эксплуатации деревянных конструкций (150 лет) коэффициент теплопроводности карбонизованного остатка снижается в 1,6 раза, а время воспламенения – в 1,5 раза. Однако высокие окислительные и теплотворные характеристики кокса, а также возможность его беспламенного (тлеющего) горения в дальнейшем являются причинами значительного термического повреждения конструкций. Это в целом приводит к снижению предела огнестойкости деревянной конструкции по потере несущей способности в 2,2 раза.

Учитывая большую вариативность условий и сроков эксплуатации деревянных конструкций в зданиях и сооружениях, разновидностей конструкций и особенностей их применения, схем нагружения и видов напряжённых состояний необходимо продолжение исследований в рамках научного направления по изучению влияния длительности эксплуатации на горючесть и огнестойкость деревянных конструкций.

## Литература

1. *Асеева Р.М., Барботько С.Л., Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Сулейкин Е.В., Тарасов Н.И.* Влияние времени эксплуатации древесины на её пожароопасные свойства // Сборник X междунар. конф. по химии и физико-химии олигомеров "Олигомеры – 2009". Волгоград: ВГТУ, 2009. С. 270-295.
2. *Покровская Е.Н.* Прогнозирование долговечности древесины методом термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2001. № 6. – С. 31-32.
3. *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.
4. *Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Сулейкин Е.В., Дегтярев Р.В., Тарасов Н.И.* Особенности пожарной опасности археологической древесины // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 1. С. 4-28.
5. *Зоуфал Р., Каишар Я.* Исследование деревянных конструкций с учётом пожарной безопасности // Бюллетень высшей специальной школы МВД НРБ. София, 1986. С. 70-88.
6. *Харитонов В.Г., Хмелидзе Т.П.* Поведение клееных 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.
7. *White R.H., Nordheim E.V.* Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure // Fire Technology. 1992. Vol. 28. № 1. Pp. 5-30/
8. *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.
9. *СП 64.13330.2011.* Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
10. *EN 1995-1-2-2004* Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General-Structural fire design.