

Определение температуры и длительности горения древесины на пожаре по параметрам обугленного слоя: методические рекомендации

И.С. Таубкин

Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы при Министерстве юстиции Российской Федерации, Москва 109028, Российская Федерация

Аннотация. Дан критический анализ методики по определению температуры и длительности горения древесины на пожаре по параметрам ее обугленного слоя. Показана возможность использования для производства пожарно-технических экспертиз значения скорости обугливания изделий большого сечения (балок, колон) из древесины хвойных пород, приведенного в СП 64.13330.2011.

Ключевые слова: пожарно-техническая экспертиза, пожар, горение, длительность горения, температура, древесина, конструкции, обугливание, уголь, пиролиз, предел огнестойкости

Для цитирования: Таубкин И.С. Определение температуры и длительности горения древесины на пожаре по параметрам обугленного слоя: методические рекомендации // Теория и практика судебной экспертизы. 2017. Том 12. № 4. С. 37–47.

Determining the Temperature and Time of Wood Combustion from Char Layer Parameters: Methodological Guidelines for Fire Investigators

Igor' S. Taubkin

The Russian Federal Centre of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Moscow 109028, Russian Federation

Abstract. The paper offers a critical analysis of a methodology for determining combustion temperature and time in fire-exposed wood based on its char layer parameters. It demonstrates the possibility of using the charring rates for large cross section structural members (beams and columns) made of coniferous timber, as specified in SP 64.13330.2011, for the purposes of forensic fire investigation.

Keywords: forensic fire investigation, fire, combustion, time of combustion, temperature, wood, structures, charring, coal, pyrolysis, fire resistance

For citation: Taubkin I.S. Determining the Temperature and Time of Wood Combustion from Char Layer Parameters: Methodological Guidelines for Fire Investigators. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2017. Vol. 12. No 4. P. 37–47.

Одной из важных задач, стоящих перед судебной пожарно-технической экспертизой (СПТЭ), является установление времени возникновения горения. При наличии на месте пожара конструкций из дерева эксперты в ряде случаев используют для этого сведения о глубине и скорости их обугливания.

В разделе 1.2 «Исследование обугленных остатков древесины и древесно-стружечных плит. Установление температуры и длительности *пиролиза*¹» сборника методических рекомендаций [1] приведена методика инструментального определения температуры и длительности горения по

¹ Здесь и далее курсив автора (*прим. ред.*).

результатам измерения глубины обугливания и определения отдельных физико-химических свойств угля.

Обращает на себя внимание название указанного раздела, в котором упоминается термин «пиролиз». Как известно, пиролиз древесины представляет собой процесс ее сухой перегонки-разложения при нагреве до 450 °С без доступа воздуха с образованием газообразных и жидких (в том числе древесной смолы) продуктов, а также твердого остатка – древесного угля [2]. Этот процесс может иметь место после загорания строительных конструкций из древесины, не перешедшего в пожар, с последующим ее тлением в условиях весьма ограниченного воздухообмена. При пожарах, регулируемых горючей нагрузкой, одновременно идут процессы терморазложения древесины с ее пламенным горением.

В экспериментальных исследованиях, результаты которых учитывались при разработке методики и были опубликованы [3, 4], использовали образцы древесины сосны (строганные, с продольным расположением волокон, размером 200 × 100 × 36 мм и влажностью 6–8 %). На всю глубину образца ступенчато (через 5 мм) устанавливали термопары. В статье И.Д. Чешко с соавторами [3] указано: «Образцы располагали горизонтально в камере (450 × 450 × 450 мм) и сжигали без доступа воздуха, подавая воздух со скоростью 120 и 240 л/мин. Последнее значение соответствует двукратному избытку воздуха по отношению к количеству, необходимому для полного сгорания образца до CO_2 и H_2O . Была использована радиационная панель мощностью 5 кВт, расположенная параллельно образцу, что позволяло поддерживать горение при одностороннем нагреве образца достаточно равномерным тепловым потоком (0,8–4,0 Вт/см²). Горение длилось 2–180 мин, после чего процесс прерывали, помещая образец в герметически закрытую емкость с углекислым газом.



Рис. 1. Поперечный разрез бруса горящей древесины. 1 – зона растрескивания и образования трещин; 2 – ненарушенная зона; 3 – углистый остаток; 4 – зона пиролиза; 5 – зона, не охваченная пиролизом. Извилистыми стрелками указаны возможные направления движения летучих продуктов [5]

Fig. 1. Profile of a burning wood beam: 1 – zone of crack propagation and fissure formation; 2 – intact zone; 3 – charcoal layer; 4 – pyrolysis zone; 5 – zone unaffected by pyrolysis. Curved arrows indicate possible directions of volatiles movement [5]

Для расчета «средневременной» температуры на поверхности образца применяли графическое интегрирование площади под кривой температуры, записываемой потенциометром КСП-4 от термопары на поверхности. На основании показаний термопар, установленных в массе образца, определяли динамику продвижения отдельных изотермических зон вглубь древесины».

Подробное описание устройства камеры и материала ее стенок, подводков к ней (и отводов) воздуха в работе [4] не приведено. Не указаны также размеры радиационной панели. Эксперименты, в которых древесину «сжигали без доступа воздуха», не дифференцированы от экспериментов, в которых внутрь камеры подавался воздух. В ходе экспериментов получены результаты обугливания термически тонкого образца сосны при воздействии на него постоянных во времени и различных по величине тепловых потоков при «средневременной» температуре на поверхности образца до 700 °С.

В связи с этим необходимо отметить следующее.

1. Как известно, во время пожара одновременное горение угля и продуктов разложения древесины (пламенное горение) продолжается до тех пор, пока вся древесина не превратится в уголь. После этого выход и горение газообразных продуктов разложения древесины прекращается, а продолжается только горение угля. В процессе горения угля и древесины уменьшается не только сечение деревянной конструкции, но

и высота слоя угля (рис. 1). Однако максимальная глубина обугливания древесины в экспериментах осталась практически равной первоначальной толщине испытываемой дощечки (36 мм) при длительности ее нагрева в течении 100 мин. В работе же [3] отмечается: «В этих опытах образцы древесины толщиной 36 мм обугливались на всю глубину...». Это свидетельствует о том, что был реализован процесс пиролиза, а не пламенного горения древесины.

Так, в работе [3] отмечалось, что обугливание древесины происходит в результате последовательного продвижения вглубь материала «волны обугливания», которую позже авторы называли «волной пиролиза» [6]. Протицируем это дословно: «Пиролиз древесины и образование углистого слоя происходит за счет так называемой *волны пиролиза*, продвигающейся с определенной скоростью вглубь древесины... Анализ экспериментальных данных, полученных при различных внешних тепловых потоках и условиях воздухообмена, показал, что в первом приближении движение волны пиролиза и кинетика обугливания древесины вглубь могут быть описаны уравнениями нулевого порядка, т. е. зависимость глубины обугливания от времени близка к прямолинейной... Зависимость константы скорости обугливания от температуры может быть выражена уравнением Аррениуса, которое после подстановки выражения для K и коэффициентов имеет вид:

$$\ln\left(\frac{H}{\tau - \tau_0}\right) = 2,01 - 1730/T \quad (1)$$

где H – глубина обугливания древесины, мм;

τ – длительность процесса пиролиза древесины по законам «реакции нулевого порядка», т. е. с постоянной скоростью [7];

τ_0 – индукционный период – период времени, который проходит до момента, начиная с которого процесс обугливания идет со скоростью, близкой к постоянной;

T – «средневременная» температура, определяемая графическим интегрированием площади под кривой изменения температуры на поверхности древесины (угля)».

В работе [3] отмечено, что при температурах, превышающих 622 °С, τ_0 принимается равным нулю, «так как в этих случаях рост обугленного слоя начинается практически мгновенно со скоростью, близкой к посто-

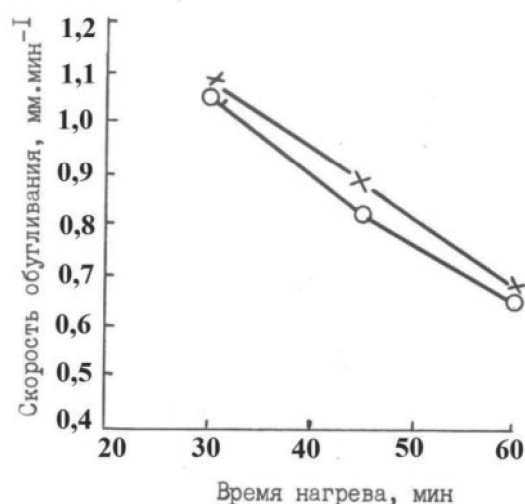


Рис. 2. Зависимость средней скорости обугливания древесины балки сечением 110 × 150 мм от продолжительности стандартного теплового воздействия: о – боковые грани; х – нижняя грань [8]

Fig. 2. Relationship between the average charring rate of a 110 × 150 mm wood beam and the duration of standard heat exposure: o – side planes; x – bottom plane [8]

янной». В этой работе приведено указанное выше (1) выражение определения глубины обугливания древесины.

Необходимо отметить, что скорость обугливания древесины на пожаре не является постоянной величиной и уменьшается по мере увеличения слоя угля, что наглядно иллюстрирует рисунок 2.

2. Многочисленные исследования различных веществ и материалов показывают, что на пиролиз существенно влияют температура, скорость ее изменения во времени, размеры пиролизуемого образца, его форма, степень распада и ряд других параметров. Так, изменение скорости нагрева образца древесины от начала процесса до его завершения приводит к качественному и количественному смещению его характерных стадий. Медленный нагрев приводит к сдвигу температурных границ стадий пиролиза в область более низких значений, и наоборот, повышение скорости нагрева – в область более высоких значений [9]. При этом темп нагрева образца древесины в работе [3] не указан.

3. Процесс пиролиза существенно зависит от того, находится ли образец в контакте с продуктами разложения или же последние удаляются из реакционного сосуда [9]. Однако результаты экспериментов, в кото-

рых древесину сжигали без доступа воздуха, как отмечено выше, не дифференцированы от экспериментов, в которых внутри камеры подавался воздух.

4. В работах [1, 3, 4, 6] неоднократно упоминается «средневременная» температура на поверхности древесины. Каков ее физический смысл и как она соотносится с температурой, действующей на деревянные конструкции при реальном пожаре, не указано. Значение «средневременной» температуры, «определяемое интегрированием площади под кривой изменения температуры за определенный промежуток времени» [1, с. 14], трудно представить как математическую величину. Однако, отмечается [1, с. 20]: «В достаточной степени условно и само понятие средневременной интегральной температуры как параметра, характеризующего температурный режим в определенной точке (зоне) конструкции».

5. Влияние вентиляции, о наличии которой указывалось выше при описании условий проведения экспериментов (о ней в тексте больше не упоминается), на процесс обугливания древесины не выяснено. Однако утверждается, что «режим газообмена не оказывает существенного влияния на кинетику убыли массы образцов. При малых внешних тепловых потоках увеличение подачи воздуха лишь увеличивает теплопотери и снижает температуру на поверхности образца, что замедляет скорость термоокислительной деструкции, более интенсивное тепловое воздействие нивелирует влияние теплопотерь... величиной, определяющей скорость процесса термоокислительной деструкции древесины, является температура нагрева». Можно полагать, эта фраза подтверждает, что речь в работе идет о пиролизе древесины, а не о ее пламенном горении.

Для пламенного горения древесины в отличие от пиролиза требуется воздух, и поэтому вентиляция помещения, где произошел пожар, существенно влияет на скорость обугливания древесины.

6. Наибольшая интенсивность излучения при пожаре в каком-либо помещении здания составляет 16,8 Вт/см² [10]. В работе же [3] использовалась радиационная панель, излучение которой было в пределах всего 0,4–4,0 Вт/см². Очевидно, что этим можно частично объяснить проведение экспери-

ментов при «средневременной» температуре на поверхности образца до 700 °С. Как известно, температура стандартного пожара (718 °С) достигается уже при длительности горения 15 мин.

7. В работах [3, 7] отмечалось, что математическая обработка имеющегося массива данных по электросопротивлению обугленных остатков древесины показала, что изменение электросопротивления в зависимости от длительности пиролиза также может быть описано уравнением формальной кинетики для реакции второго порядка, а зависимость скорости изменения этого параметра от температуры – уравнением Аррениусового типа следующего конечного вида:

$$\frac{\ln(10 - P)}{P \cdot \tau} = 4,16 - \frac{6270}{T},$$

где $P = \lg r$ – десятичный логарифм удельного электрического сопротивления угля.

Описание условий проведения экспериментов по установлению зависимости удельного электрического сопротивления «угля от температуры и продолжительности пиролиза (горения)» в работах [3, 7, 11] не приведено.

Рассмотрим некоторые особенности использования методики исследования обугленных остатков древесины и получаемых с ее помощью результатов, изложенные в [1].

1. Расчетные уравнения, положенные в основу данной методики, получены при обработке результатов анализа поверхностных (3–5 мм) слоев угля и могут использоваться, если пробы для исследования отбирали именно из этих, поверхностных, слоев. Масса угля, образовавшаяся в результате горения древесины, далеко не однородна по структуре и свойствам, которые изменяются последовательно, от слоя к слою, начиная от наиболее карбонизированного поверхностного слоя. Поэтому расчет по приведенным формулам результатов исследования проб, отобранных из более глубоких слоев, неминуемо даст *искаженные результаты*.

2. Положенная в основу методики теоретическая модель и полученные эмпирические расчетные формулы, естественно, описывают очень сложный и многофакторный процесс горения древесины и древес-

ных углей на пожаре *достаточно приближенно*. По сравнению с реальным пожаром расчетная длительность горения ($\tau_{обш}$) может получаться заниженной, так как невозможно учесть период, предшествующий началу пиролиза древесины, например период тления материалов, находящихся в соприкосновении с древесиной. Завышение величин T и существенное занижение $\tau_{обш}$ будет происходить в том случае, если участок очага пожара, где развивалось длительное тление, дополнительно подвергся затем достаточно интенсивному тепловому воздействию от горящих вокруг предметов.

При использовании полученных расчетных величин в качестве абсолютных (обычно для оценки продолжительности горения) необходимо позиционировать их как *минимальные и с точностью* в пределах 5 мин («горение в данной зоне происходило не менее 20–25 мин» и т. п.).

3. Приведенные выше расчетные формулы могут быть использованы для исследования обугленных остатков древесины как хвойных (сосна, ель), так и лиственных пород (береза, осина). Никаких существенных отличий в динамике обугливания и в указанных выше физико-химических свойствах углей у древесины названных пород не выявлено.

В связи с изложенным необходимо отметить следующее.

Как отмечалось выше, пиролиз древесины представляет собой процесс ее сухой перегонки, разложения при нагреве до 450 °С без доступа воздуха с образованием газообразных и жидких продуктов, а также твердого остатка – древесного угля. На пожаре горение древесины происходит в виде пламенного горения летучих компонентов, выделяющихся из нее при терморазложении, и горения образовавшегося на ней слоя угля. Вышеприведенный экспериментальный материал, а также используемая терминология (*пиролиз (горение)*) свидетельствуют о том, что авторы работ имели дело с процессом пиролиза древесины, а не с ее пламенным горением.

В методике отмечалось, что расчет по приведенным в ней формулам достоверен лишь в том случае, если пробы угля для определения их физико-химических свойств, в том числе удельного объемного сопротивления, отбирались из поверхностных слоев угля. В противном случае этот расчет *неминуемо даст искаженные ре-*

зультаты. В связи с этим возникает вопрос о том, как отобрать эти пробы угля из поверхностных слоев, которые при пламенном горении древесины на пожаре выгорают (см. рис. 1).

В работах [1, 6, 7] отсутствует четкое обоснование давления при определении электросопротивления древесных углей.

Погрешность расчетов по предлагаемым формулам в работе не указывается, что недопустимо для судебно-экспертной методики.

Необходимо особо отметить, что результаты экспериментальных работ у нас в стране и за рубежом свидетельствуют о том, что средняя скорость обугливания древесины зависит от ее породы, структуры (цельная или клееная), изменения и продолжительности температурного режима пожара, условий притока воздуха, плотности и влажности древесины, количества одновременно обогреваемых сторон деревянного элемента конструкции, размеров его сечения и состояния поверхности (строганая, пиленая), а также от наличия сквозных крепежных деталей и вклеенных стальных стержней [8, 10, 12–21].

Для устранения всех имеющихся сомнений в достоверности методики по исследованию обугленных остатков древесины необходимо было бы верифицировать получаемые с ее помощью результаты, сравнив их с данными о температурах и времени обугливания древесины при испытании ее на огнестойкость по ГОСТ 30247-94².

С учетом вышеуказанных замечаний методика инструментального определения температуры и длительности горения по результатам измерения глубины обугливания и определения отдельных физико-химических свойств угля [1] не должна применяться при производстве судебных пожарно-технических экспертиз.

Анализ судебно-экспертной практики свидетельствует о том, что эксперты СПТЭ в ряде случаев определяют скорость обугливания древесины V_0 (мм/мин) в зависимости от интенсивности теплового потока (I , кВт/м²) согласно формуле, приведенной в работе [5] и заимствованной из работы [22]:

$$V_0 = 2,2 \cdot 10^{-2} \cdot I, \text{ мм/мин} \quad (2)$$

В работе Д. Драйздейла [5] отмечено, что при температуре 1100 °С, какая разви-

² ГОСТ 30247-94 «Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования».

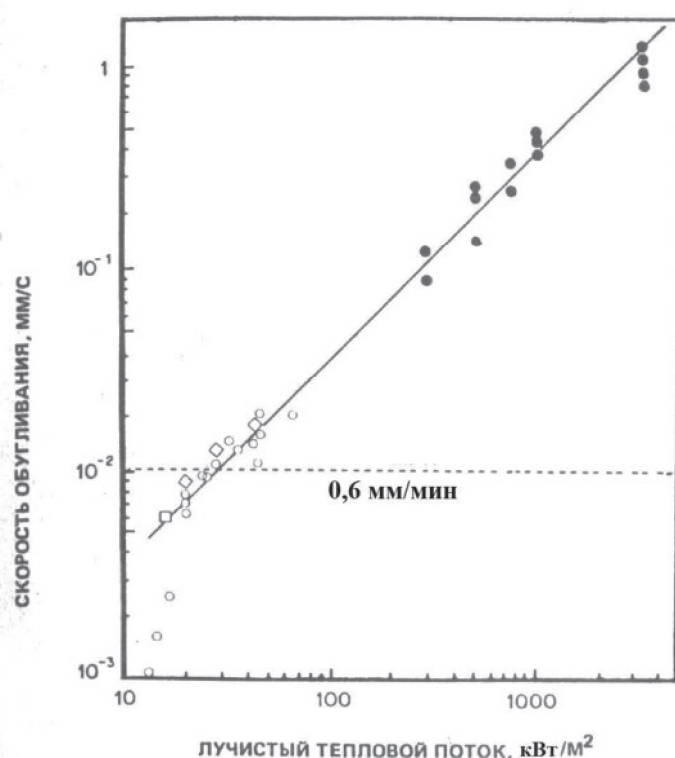


Рис. 3. Изменение скорости обугливания древесины в зависимости от интенсивности лучистого теплового потока [5]
Fig. 3. Change of the wood charring rate as a function of radiant heat flux intensity [5]

вается в отдельных зонах помещения при пожаре, интенсивность излучения черного тела в соответствии с законом Стефана – Больцмана составляет 200 кВт/м². В этом случае скорость обугливания древесины согласно формуле (2) должна достигнуть 4,4 мм/мин (рис. 3).

В той же работе [5] далее отмечается:

– ситуация, показанная на рис. 3, «относится к брускам достаточно толстым, чтобы их можно было рассматривать как полубесконечные твердые тела применительно к длительности горения, считаясь при этом с тем, что тепловому воздействию подвергается относительно тонкий слой, расположенный под регрессирующей поверхностью горючего материала;

– большие скорости горения будут наблюдаться для термически тонких образцов при условии, что теплоотвод от тыльной стороны образца твердого горючего материала не будет достаточно высоким».

В работе [22] представлены результаты определения скорости обугливания древесины в двух лабораториях: Fire Research Station (FRS) в Борхэм Вуд и Naval Radiologies Defense Laboratory (NRDL) в

Сан-Франциско. Источником теплового излучения на FRS было подковообразное пламя газа, сжигаемого в печи, работающей при температуре 870 °С. Максимальное спектральное излучение этого пламени осуществлялось при длинах волн 2,5 мкм. В NRDL источником излучения была плазма угольной дуги, максимальная спектральная излучательная способность которой составляла 0,5 мкм, что соответствовало температуре излучения приблизительно 5000 °К. В FRS использовались длинные импульсы с низким уровнем излучения (0,5–6,0 Вт/см²), в NRDL – короткие импульсы с высоким уровнем излучения (30–330 Вт/см²).

Площадь потока излучения равномерной освещенности образца равнялась в FRS площади квадрата со стороной 10 см. В NRDL эта область была ограничена возможностями оптики печи и составила окружность диаметром 0,95 см. Для экспериментов в FRS использовали образцы балтийской секвойи влажностью 10 %, а в NRDL – гватемальского кедра с содержанием влаги 8,5 %. В обеих лабораториях плоскость образцов древесины позиционировали по нормали к падающим лучам. Зависимость скорости обугливания древесины V_0 (см/с) от интенсивности теплового потока I (Вт/см²), полученная по результатам этих экспериментов, представлена в несколько ином виде, нежели в работе [5]:

$$V_0 = 3,67 \cdot 10^{-4} \cdot I, \text{ см/с}$$

На графике (рис. 3) кружочками обозначены результаты экспериментов в FRS, а черными точками – в NRDL.

Следует особо отметить, что указанная зависимость получена в лабораторных условиях, т. е. на термически тонких образцах, а главное, без учета времени получения конечного результата, т. е. без учета механизма обугливания древесины. При этом условия теплообмена при облучении древесины на лабораторной установке отличались от условий реального пожара в помещениях,

Таблица 1. Результаты испытаний клееных балок сечением 140 × 150 мм
Table 1. Results of tests performed on 140 × 150 mm glue-laminated beams

№ обр.	Размеры сечения балки, b × h	Влажность древесины, %	Время прогрева, мин	Глубина обугливания Z _{бок} , мм	V _{бок} *, мм/мин	Глубина обугливания Z _{низ} , мм	V _{низ} **, мм/мин
1	140 × 150	10,3	30	32	1,07	32,5	1,08
2		12,6	45	37	0,82	40	0,89
3		9,2	60	39	0,65	41	0,68

* – скорость обугливания боковых сторон балки, ** – скорость обугливания нижней стороны балки

поскольку теплопередача излучением преобладает на более поздних стадиях развития горения, а на его ранней стадии передача тепла к поверхности материальной обстановки помещения осуществляется за счет конвекции в потоке горячих газов. Интенсивность теплопередачи излучением при пожаре складывается из теплового излучения пламени и излучения нагретых поверхностей стен, перегородок, пола и потолка. Интенсивность излучения от огневого воздействия в период пожара повышается примерно в два раза, температура увеличивается от 900 до 1100 °С. При этом изменяется цвет пламени: при 900 °С пламя вишнево-красное, при 1100 °С – оранжевое, свыше 1400 °С – белое. Следовательно, если пламя при пожаре в здании оранжевого или желтого цвета, значит температура пламени составляет 1100–1200 °С. Наибольшая интенсивность излучения при пожаре в каком-либо помещении здания составляет 16,8 Вт/см² [10].

Таким образом, использование расчетной зависимости для определения скорости обугливания древесины из работы [5] может привести к весьма завышенным значениям.

Как известно, обугливание представляет собой процесс образования карбонизированного остатка в результате пиролиза или неполного сгорания³.

Определение этого параметра в инженерной практике было обусловлено широким применением в строительстве деревянных конструкций и необходимостью определения предела их огнестойкости. При этом во всех литературных источниках, связанных с этой проблемой, речь идет о *средней скорости обугливания* в период теплового воздействия на конструкции из древесины по стандартному температурному режиму в специальных печах. Это обусловлено тем, что значение этой скорости

вначале нарастает быстро, а затем постепенно уменьшается вследствие теплоизоляции, создаваемой слоем образовавшегося угля [8, 13, 23].

Эту закономерность наглядно иллюстрируют результаты огневых испытаний клееных балок из сосны, проведенных по стандартному температурному режиму (табл. 1) [8].

О теплоизолирующих свойствах этого слоя древесного угля свидетельствуют результаты огневых испытаний клееной деревянной балки сечением 280 × 1160 мм, проведенных по стандартному температурному режиму, при которых температура в центре балки при ее часовом обугливание не превышала 40 °С. При этом температура на границе уголь–древесина находилась в пределах 270 °С лишь в слое незначительной толщины [23]. Аналогичные результаты получены при испытаниях по тому же температурному режиму клееных балок сечением 140 × 150 мм и 120 × 410 мм [8].

Основной причиной обрушения деревянных конструкций на пожаре является уменьшение их сечения в результате обугливания древесины и роста в нем напряжений под действием нормативной нагрузки и, как следствие, достижение предела прочности их древесины [23]. Поскольку такой обугленный слой не обладает механической прочностью, несущая способность элемента уменьшается по мере увеличения глубины обугливания. Кроме того, центральная, не обугленная часть сечения элемента также частично теряет свою прочность вследствие нагрева.

Предел огнестойкости характеризует способность конструктивных элементов здания (стеновой панели, колонны, балки, плиты перекрытия и т. д.) сохранять в период пожара свои несущие или огнепреграждающие функции. Под пределом огнестойкости следует понимать некоторый ограниченный промежуток времени, в течение которого опытный образец конструкции, выполнен-

³ СТ СЭВ 383–87 «Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения».

ный из горючих или негорючих материалов, способен сопротивляться огневому воздействию по стандартному температурному режиму пожара, не утрачивая при этом вышеуказанных функций. Наступление предела огнестойкости опытного образца характеризуется тремя основными критериями: потерей несущей способности (R); потерей целостности (E) и потерей теплоизолирующей способности (I).

Согласно п. 6.1 ГОСТ 30247.0-94⁴, регламентирующего общие требования к методам испытаний строительных конструкций на огнестойкость, стандартный температурный режим характеризуется следующей зависимостью:

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8t + 1), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t , $^\circ\text{C}$;

T_0 – температура в печи до начала теплового воздействия (принимают равной температуре окружающей среды), $^\circ\text{C}$;

t – время, исчисляемое с начала испытания, мин.

Отклонение H средней измеренной температуры в печи T_{cp} от значения T , вычисленного по вышеуказанной формуле, определяют в процентах по формуле

$$H = \frac{T_{cp} - T}{T} \times 100, \%$$

За среднюю измеренную температуру T_{cp} в печи принимают среднее арифметическое значение показаний печных термомпар в момент времени t .

Температуры, соответствующие зависимости (3), а также допускаемые отклонения от их средних измеренных температур приведены в таблице 2.

В соответствии с «Противопожарными нормами проектирования зданий и сооружений» 1978 года предел огнестойкости основных деревянных конструкций определялся с учетом обугливания их элементов, причем скорость обугливания принималась равной 0,7 мм/мин для элементов сечением 120×120 мм и более и 1 мм/мин – для элементов сечением менее 120 × 120 мм⁵.

Таблица 2. Параметры стандартного температурного режима пожара

Table 2. Standard fire temperature–time variation

t , мин	$T - T_0$, $^\circ\text{C}$	H , %
5	556	±15
10	659	
15	718	±10
30	821	
45	875	±5
60	925	
90	986	
120	1029	
150	1060	
180	1090	
240	1133	
360	1193	

Согласно Своду правил СП 64.13330.2011⁶, действующему в настоящее время, допускается «предел огнестойкости деревянных элементов конструкций устанавливать расчетным путем на основе закономерностей обугливания и прогрева их сечений в условиях стандартного теплового воздействия, регламентируемого ГОСТ 30247.0, и с учетом предельных состояний по огнестойкости, регламентируемых ГОСТ 30247.1».

В соответствии с этим СП: «Основными закономерностями, необходимыми для расчета пределов огнестойкости деревянных конструкций, являются:

- температура начала обугливания древесины составляет 270 $^\circ\text{C}$; эта температура достигается на поверхности древесины через 4 мин после начала стандартного теплового воздействия пожара;

- условная скорость обугливания (скорость перемещения фронта обугливания), включающая влияние угловых закруглений, для древесины хвойных пород следует принимать постоянной, равной 0,7 мм/мин;

- за фронтом обугливания температура древесины снижается по гиперболическому закону».

Эти цифры получены в результате экспериментального определения толщины слоя угля деревянных балок с достаточно большой площадью и простой формой сечения, которые подвергались стандартным огневым испытаниям, т. е. в соответствии со «стандартным температурным режимом» пожара [14].

Указанные в этих нормативно-правовых документах значения скорости обугливания,

⁴ ГОСТ 30247-94 «Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования».

⁵ СНиП II-A.5-70* «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений». М.: Стройиздат, 1978.

⁶ СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80».

Таблица 3. Данные эксперимента по обугливанию сосновых клееных балок в условиях стандартного пожара
Table 3. Experimental findings from a charring test performed on glue-laminated pine beams under standard fire conditions

Вид изделия, древесины	Размер сечения, b×h мм	Время воздействия теплового потока, час	Температура пожара, °С	Скорость обугливания, мм/мин	Тепловое излучение, кВт/м ²	Скорость обугливания, м/мин
Клееная балка сосна	120 × 410	0,5	821	1,0	81,2	1.79
		1,08	> 925	0,53	116,8	> 2,57

принятые на основании большого количества экспериментальных работ, существенно отличаются от ее значений, полученных по формулам, приведенным в работах [5, 22]. Покажем это на следующем примере (табл. 3), используя данные эксперимента по обугливанию сосновых клееных балок в условиях стандартного пожара из работы [8]. При температурах пожара по стандартной кривой (821 и 925 °С), соответствующих времени воздействия теплового потока на древесину в печи, значение теплового излучения по закону Стефана – Больцмана составит соответственно 81,2 и 116,8 кВт/м². Для этих значений плотности теплового потока, если формально следовать приведенной в работе формуле, получим скорости обугливания древесины соответственно 1,79 и > 2,57 мм/мин, которые существенно больше экспериментально полученных значений скоростей обугливания балок.

В технической литературе по вопросам огнестойкости деревянных конструкций сведения о значениях скоростей их обугливания, соответствующих значениям этого параметра по формуле (2), при пожарах в условиях стандартного, достаточно жесткого, температурного режима, отсутствуют.

Как отмечалось выше, средняя скорость обугливания древесины зависит от многих факторов [8, 10, 12–21]. С увеличением плотности, влажности и размеров сечения деревянного элемента скорость снижается, а с увеличением температуры нагревающей среды при пожаре, притока воздуха, количества сторон обогрева и площади поверхности скорость обугливания возрастает. По сравнению с клееной древесиной скорость обугливания цельной древесины выше [16]. Более низкая скорость обугливания клееной древесины объясняется отсутствием в ней различных дефектов: сучков, косослов, смоляных включений и трещин.

Для элементов, размер сечения которых менее 120 мм, скорость обугливания древе-

сины может быть принята равной 1 мм/мин. По данным зарубежных исследователей, скорость обугливания древесины красного кедра составляет 0,8 мм/мин, других мягких пород древесины – 0,67 мм/мин, древесины твердых пород (дуба, тика и др.) – 0,5 мм/мин [14]. В другой работе [13] среднюю величину скорости обугливания дуба принимают равной 0,65 мм в 1 мин.

С увеличением продолжительности температурного воздействия скорость обугливания древесины снижается.

Поверхность деревянных колонн выгорает с меньшей скоростью, чем поверхность балок, а у последних с наименьшей скоростью выгорают верхние и боковые поверхности и с наибольшей – их нижние поверхности, прилежащие к слоям древесины, подвергнутым напряжениям растяжения [12].

Древесина, огнезащищенная методом пропитки, обугливается практически с той же скоростью, что и не защищенная. Различие этих типов древесины – в степени возгораемости и скорости распространения огня по поверхности [8, 10, 12, 14]. Скорость выгорания фанеры одинаковая с древесиной, у древесно-стружечных плит – выше и составляет около 1,1 мм/мин. Чем старше древесина, тем быстрее она горит, выделяя меньше теплоты; обуглившись слой у старой древесины глубже. Глубина обугливания древесины зависит от наличия естественной и искусственной вентиляции. При ее наличии глубина обуглившегося слоя возрастает [12].

Древесно-стружечные плиты являются сгораемым материалом. Через 2–3 мин с начала воздействия на них огня загораются и продолжают гореть после удаления источника огня. Скорость обугливания этих плит составляет в среднем 1,0–1,2 мм/мин. Аналогичным образом происходит горение и других облицовочных плит (древесно-волокнистых, фанерных сот и т. п.) при дей-

ствии на них высокой температуры в условиях пожара.

Средняя скорость обугливания древесины двери толщиной 75 мм под ее стальной обшивкой равна 0,5 мм/мин [15]. Большая скорость обугливания наблюдается у тонких конструктивных элементов, способных быстро прогреваться и подвергаться воздействию пламени со всех сторон

С учетом вышесказанного, а также принимая во внимание чрезвычайно высокую ответственность решения, принятого законодателем в СП 64.13330.2011 о расчете предела огнестойкости несущих конструктивных элементов зданий различного назначения по условной скорости обугливания, можно сделать следующие выводы.

В случае пожара с участием клееных конструктивных элементов из древесины хвойных пород сечением 120 × 120 мм и более (балок, колонн, чердаков жилых зданий, а

также несущих конструктивных элементов общественных и производственных зданий – спортивных арен, бассейнов, складов и др.), прошедшего по стандартному температурному режиму, для приблизительной оценки времени пламенного горения можно воспользоваться данными о скорости обугливания древесины, равной 0,7 мм/мин, и значением глубины обугленного слоя.

Использование значений средней скорости обугливания для определения времени пламенного горения элементов мебели при пожарах в зданиях различного назначения недопустимо.

При отклонении температурного режима пожара от стандартного необходимо привести его к последнему [15, 23].

В судебно-экспертной практике для оценки времени пламенного горения изделий из древесины хвойных пород большого сечения можно использовать вышеприведенные положения СП 64.13330.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение инструментальных методов и технических средств в экспертизе пожаров: сб. метод. рекомендаций / Под ред. И.Д. Чешко и А.Н. Соколовой. СПб.: С.-Петербург. филиал ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. 279 с.
2. Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянца. Т. 3. М.: Большая рос. энцикл., 1988. 639 с.
3. Чешко И.Д., Егоров Б.С. Леонович А.А., Смирнов К.П. Исследование процесса обугливания древесины при горении и изучение свойств обугленных остатков. 1. Кинетика обугливания древесины // Химия древесины. 1986. № 2. С. 39–93.
4. Чешко И.Д., Егоров Б.С. Леонович А.А., Голяев В.Г., Смирнов К.П. Исследование процесса обугливания древесины при горении и изучение свойств обугленных остатков. 2. Свойства обугленных остатков // Химия древесины. 1986. № 2. С. 94–100.
5. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
6. Чешко И.Д., Егоров Б.С., Голяев В.Г., Смирнов К.П. Экспертное исследование обугленных остатков древесины в условиях теплового воздействия и выявления очаговых признаков пожара // Экспертная техника. Вып. 99: Новые методы и методики исследования объектов судебных инженерно-технических экспертиз. М.: ВНИИСЭ, 1987. С. 3–37.
7. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). СПб.: С.-Петербург. ин-т пож. безопасности МВД РФ, 1997. 562 с.

REFERENCES

1. Cheshko I.D., Sokolova A.N. (eds). *Application of instrumental methods and technical means in examination of the fires: collection of methodical recommendations*. St. Petersburg: Ministry of Emergency Situations of Russia. 2008. 279 p. (In Russ.).
2. Knunyants I.L. (ed). *Chemical encyclopedia*. Vol. 3. Moscow: Big Russian encyclopedia, 1988. 639 p. (In Russ.).
3. Cheshko I.D., Egorov B.S. Leonovich A.A., Smirnov K.P. Research of process of carbonization of wood when burning and studying properties of the charred remains. 1. Wood carbonization kinetics. *Wood chemistry = Khimiya drevesiny*. 1986. No 2. P. 39–93. (In Russ.).
4. Cheshko I.D., Egorov B.S. Leonovich A.A., Golyaev V.G., Smirnov K.P. Research of process of carbonization of wood when burning and studying properties of the charred remains. 2. Properties of the charred remains *Wood chemistry = Khimiya drevesiny*. 1986. No 2. P. 94–100. (In Russ.).
5. Draizdel D. *Introduction to dynamics of the fires*. Moscow: Stroizdat, 1990. 424 p. (In Russ.).
6. Cheshko I.D., Egorov B.S. Golyaev V.G., Smirnov K.P. Expert research of the charred wood remains in the conditions of thermal impact and identification of focal signs of the fire. *Expert techniques. Issue 99: New methods and techniques of a research of objects of forensic technical examinations*. Moscow: VNIISE, 1987. P. 3–37. (In Russ.).
7. Cheshko I.D. *Examination of the fires (objects, methods, research techniques)*. St. Petersburg.: Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 1997. 562 p. (In Russ.).

8. Харитонов В.С. Несущая способность изгибаемых клеевых деревянных конструкций массивного сечения при тепловом воздействии: дис. ... канд. техн. наук. М., 1992. 190 с.
9. Абдуррагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. 268 с.
10. Ленгдон-Томас Г. Дж. Пожарная безопасность в строительстве. Теория и практика / Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1977. 256 с.
11. Смирнов К.П., Чешко И.Д., Егоров Е.С. и др. Комплексная методика определения очага пожара. Л.: ВНИИПО МВД СССР, 1987. 114 с.
12. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. М.: ВНИИПО, 1999. 600 с.
13. Огнестойкость зданий (из научно-исследовательских материалов по строительству) / Пер. с франц.; под ред. Н.А. Тарасова-Агалакова. М.: Стройиздат, 1953. 227 с.
14. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат, 1984. 241 с.
15. Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. М.: Стройиздат, 1970. 261 с.
16. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. М.: Спецтехника, 2001. 483 с.
17. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А. Пожарная безопасность. М.: Ассоциация строительных вузов, 1977. 176 с.
18. Бартелеми Б., Крюпа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с фр. М.В. Предтеченского. М.: Стройиздат, 1985. 261 с.
19. White R.H. Fire Performance of Hardwood Species. URL: http://www.intersomma.com/yahoo_site_admin/assets/docs/FIRE_RATING_OF_HARDWOODS.24175959.pdf (дата обращения: 24.10.2016).
20. Mačiulaitis R., Lipinskas D., Lukosius L. Singularity and Importance of Determination of Wood Charring Rate in Fire Investigation. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2006. Vol. 12. No 1. P. 42–47.
21. Арцыбашева О.В., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Современные тенденции в области огнестойкости деревянных зданий и сооружений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 8 (145). С. 178–196.
22. Butler C.P. Notes on charring rates in wood. *Fire Research Note*. 1971. No. 896. 13 p.
23. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. М.: Стройиздат, 1985. 590 с.
8. Kharitonov V.S. *The bearing ability of the bent glue wooden constructions of massive section at thermal influence: Candidate thesis (Technical)*. Moscow, 1992. 190 p. (In Russ.).
9. Abduragimov I.M., Androsov A.S., Isaeva L.K., Krylov E.V. *Burning processes*. Moscow: VIPTSh MVD SSSR, 1984. 268 p. (In Russ.).
10. Langdon-Thomas I.J. *Fire Safety in Buildings, Principles and Practice*. Adam and Charles Blade, London, 1972.
11. Smirnov K.P., Cheshko I.D., Egorov E.S. et al. *Complex technique of definition of the seat of fire*. Leningrad: Ministry of Internal Affairs of the SSSR, 1987. 114 p. (In Russ.).
12. Taubkin S.I. *Fire and explosion, features of their examination*. Moscow: VNIPO, 1999. 600 p. (In Russ.).
13. Tarasov-Agalakov N.A. (ed) *Fire resistance of buildings (from research materials on construction)*. Moscow: Stroiizdat, 1953. 227 p. (In Russ.).
14. Romanenkov I.G., Zigern-Korn V.N. *Fire resistance of building constructions from effective materials*. Moscow: Stroiizdat, 1984. 241 p. (In Russ.).
15. Bushev V.P., Pchelintsev V.A., Fedorenko V.C., Yakovlev A.I. *Fire resistance of buildings*. Moscow: Stroiizdat, 1970. 261 p. (In Russ.).
16. Mosalkov I.L., Plyusnina G.F., Frolov A.Yu. *Fire resistance of building constructions*. Moscow: Spetstekhnika, 2001. 483 p. (In Russ.).
17. Baratov A.N., Pchelintsev V.A. *Fire safety*. Moscow: association of construction higher education institutions, 1977. 176 p. (In Russ.).
18. Barthélémy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton-acier-bois*. 1978. Paris, Ed. Eyrolles.
19. White R.H. *Fire Performance of Hardwood Species*. URL: http://www.intersomma.com/yahoo_site_admin/assets/docs/FIRE_RATING_OF_HARDWOODS.24175959.pdf.
20. Mačiulaitis R., Lipinskas D., Lukosius L. Singularity and Importance of Determination of Wood Charring Rate in Fire Investigation. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2006. Vol. 12. No 1. P. 42–47.
21. Arcybasheva O.V., Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Modern trends in the field of fire resistance wooden buildings and constructions. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013. No 8 (145). P. 178–196. (In Russ.).
22. Butler C.P. Notes on charring rates in wood. *Fire Research Note*. 1971. No. 896. 13 p.
23. Roitman M.Ya. *Fire-prevention regulation in construction*. Moscow: Stroiizdat, 1985. 590 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Таубкин Игорь Соломонович – кандидат технических наук, главный научный сотрудник ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России; e-mail: igor-tau@mail.ru.

ABOUT THE AUTHOR:

Taubkin Igor' Solomonovich – Candidate of Engineering, Principal Researcher, RFCFS of the Russian Ministry of Justice; e-mail: igor-tau@mail.ru.