

ОБЗОР ПРИБЛИЖЁННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ОБУГЛИВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Д. Голиков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Е.Ю. Черкасов, кандидат технических наук;

С.Ф. Лобова.

**Научно-исследовательский институт перспективных исследований
и научных технологий в области безопасности жизнедеятельности
Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России**

Приведен аналитический обзор расчётных методов оценки скорости обугливания древесины. Показано, что на настоящее время развитие получили методы оценки максимальных глубин обугливания для проектирования строительных конструкций с требуемыми пределами огнестойкости. Решение обратной задачи, то есть определение точного времени обугливания конкретного образца по заданной глубине, затруднительно из-за сложности учёта влияния всех факторов, влияющих на его скорость обугливания.

Ключевые слова: строительные конструкции, древесина, обугливание, огнестойкость

Древесина является одним из самых распространённых строительных материалов. В условиях пожара снижение несущей, теплоизолирующей способностей и потеря целостности деревянных конструкций наступает вследствие обугливания, выгорания и разрушения их элементов и узловых соединений. Поэтому регулярно возникает необходимость оценки глубины повреждений при пожарах и пределов огнестойкости деревянных конструкций. Скорость обугливания различных пород древесины зависит от температурного режима пожара, плотности и влажности древесины, количества сторон обогрева и сечения деревянного элемента. Для оценки глубины обугливания можно воспользоваться дифференциальными моделями или приближёнными формулами. Дифференциальная модель обугливания древесины была опубликована в 1946 г. С.Н. Vamford, J. Crank и D.H. Malan [1] и с того времени получила значительное развитие. Факторами, сдерживающими её применение на практике, являются достаточно сложный математический аппарат, отсутствие доступного программного обеспечения и большое количество экспериментальных констант, необходимых для проведения расчётов. Ввиду этого, остаётся актуальным использование приближённых эмпирических формул при решении прямых и обратных задач.

Существующие эмпирические формулы обугливания древесины можно разделить на группы по тепловому воздействию на конструкцию:

- стандартный температурный режим пожара;
- изотермический температурный режим;
- температурный режим пожара в помещении.

Во время расчета глубины обугливания деревянных конструкций при воздействии стандартного температурного режима пожара скорость обугливания древесины принимается постоянной. Методика расчета пределов огнестойкости сплошных деревянных конструкций изложена в работе [2]. Время сквозного прогорания деревянной конструкции τ (предельное состояние по потере целостности E) и время прогрева необогреваемой поверхности τ' до критической температуры (предельное состояние по потере теплоизолирующей способности I) выражаются зависимостями:

$$\tau = \tau_L + \frac{d}{v} \cdot \alpha,$$

$$\tau' = \tau_L + \frac{d - \Delta\delta}{v} \cdot \alpha,$$

где τ_L – время до начала горения деревянной конструкции, поскольку в начале огневого воздействия происходит нагрев приповерхностных слоев древесины без обугливания и испарение находящейся в них влаги; d – суммарная толщина древесины, мм; v – скорость обугливания (при толщине конструкции $d = 10\text{--}60$ мм, $v = 0,8$ мм/мин); α – коэффициент, зависящий от вида деревянной конструкции и возможности ее местного прогорания (в случае стыковки в четверть или в шпунт значение $\alpha = 0,5$); $\Delta\delta$ – остаточный, необугленный слой древесины, при котором температура необогреваемой поверхности деревянной конструкции достигает предельного значения по теплоизолирующей способности, определяемый по работе [2]. Значение $\Delta\delta$ принято равным 6 мм на основании экспериментальных данных.

Schaffer [1] определил зависимость скорости обугливания древесины поперёк волокон от плотности и влажности для ели Дугласа, южной сосны и белого дуба:

$$B_{\text{ЕЛЬ}} = (0.002269 + 0.00457 \cdot u) \cdot \rho + 0.331;$$

$$B_{\text{СОСНА}} = (0.000461 + 0.00095 \cdot u) \cdot \rho + 1.016;$$

$$B_{\text{ДУБ}} = (0.001583 + 0.00318 \cdot u) \cdot \rho + 0.594,$$

где u – влагосодержание древесины, определяется как отношение веса воды в древесине к весу сухого дерева; B – величина, мин /мм, обратная скорости обугливания v .

С увеличением влагосодержания древесины скорость обугливания v снижается. Например, для южной сосны:

- при $u=0$ (сухая древесина) $v = 0.80$ мм/мин;
- при $u=9\%$ (воздушно сухая древесина) $v = 0.78$ мм/мин;
- при $u=100\%$ («зелёная» древесина) $v = 0.58$ мм/мин.

White [1] разработал эмпирическую модель, учитывающую плотность, влажность древесины и её усадку при обугливании:

$$t = m \cdot x_C^{1.23}, \quad (1)$$

где t – время, мин; m – коэффициент степени обугливания, мин/мм^{1.23}; x_C – толщина слоя угля, мм.

Коэффициент степени обугливания m выражен следующим способом:

$$m = -0.147 + 0.000564 \cdot \rho + 1.21 \cdot u + 0.532 \cdot f_C,$$

где ρ – плотность сухой древесины, кг/м³; u – содержание влаги; f_C – коэффициент усадки.

Коэффициент усадки f_C отражает процесс уменьшения размеров сечения при обугливании и равен отношению толщины угольного слоя в конце испытания к изначальной толщине древесины. Средняя величина коэффициента усадки для южной сосны равна 0,60; для западного красного кедра – 0,83; для красного дерева – 0,86; для ели Энгельманна – 0,82; для клёна – 0,59; для красного дуба – 0,70 и для желтого тополя – 0,67.

Можно заметить, что формула (1) согласуется с формулой Б. Бартелими и Ж. Крюппа для определения толщины огнезащитного покрытия на основе одного классификационного испытания, предложенной в работе [3]:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{e_1 \cdot \delta_1}{e_2 \cdot \delta_2} \right)^{0.8}, \quad (2)$$

где t_1 – время достижения определённой температуры в стальном элементе; δ_1 – приведённая толщина первой защищаемой конструкции; e_1 – толщина огнезащитного материала первой конструкции; t_2 – время, требующееся для достижения той же температуры во втором стальном элементе; δ_2 – приведённая толщина второй защищаемой конструкции; e_2 – толщина огнезащитного материала второй конструкции.

При одинаковых приведённых толщинах конструкции формула (2) приобретает вид:

$$\frac{e_1}{e_2} = \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1.25}.$$

В случае аналогичного оценивания глубины обугливания древесины с использованием формулы (1) получаем:

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1.23}.$$

Незначительность различия показателя степени подтверждает слова авторов [3] о том, что формула (2) действительно независимо от типа защитного облицовочного материала и для древесины тоже.

В «Standard ASTM E119 Fire Exposure» [1] скорость обугливания поперек волокон при воздействии стандартного температурного режима пожара принята в результате обобщения

экспериментальных данных для всех сортов дерева равной 0,6 мм/мин. Обугливание вдоль волокон происходит примерно вдвое быстрее. По данным [4] для элементов сечением 120×120 мм и более $v = 0,7$ мм/мин, менее 120×120 мм – $v = 1,0$ мм/мин.

Предположение постоянства скорости обугливания исходит из того, что толщина испытуемого образца имеет достаточную толщину для постановки задачи прогрева полубесконечного массива. Для более тонких образцов, где скорость обугливания возрастает по мере повышения температуры необогреваемой поверхности, Канугу и Нолве была предложена следующая модель [1]:

$$\frac{l}{t} \approx \left(\frac{2}{a}\right) \left(1 - \frac{b \cdot l}{a}\right),$$

где l – толщина образца, мм; t – время воздействия пожара, мин; a , b – экспериментальные константы.

Фактор $2/a$ является «идеальной» скоростью обугливания, а комплекс $b \cdot l/a$ учитывает теплопроводность и толщину объекта.

При изотермическом температурном режиме на поверхности процесс обугливания древесины рассмотрен в работе [5]. Скорость обугливания также принята постоянной, зависящей

от температуры, времени воздействия и толщины образца. Соотношение, если судить по работе [5], получено следующим путем.

1) Для досок толщиной 36 мм экспериментально определена глубина обугливания.

2) Определен коэффициент корреляции между логарифмом скорости обугливания и температурой теплового воздействия.

3) Определены коэффициенты аппроксимации логарифма скорости обугливания от температуры.

4) Перенос скорости обугливания доски толщиной 36 мм на другие толщины в соответствии с работой [5] путём умножения на $\sqrt{h/36}$, где 36, мм – толщина досок, на которой получены экспериментальные результаты, h – толщина доски, у которой определяется скорость обугливания.

5) Введена поправка на время задержки начала обугливания $\tau_0 = (77 - 0.086 \cdot T)$, которая производится после вычисления T . Поправка применяется при температуре менее 895 К. При более высоких температурах τ_0 считается равным нулю.

6) Получена зависимость скорости обугливания от температуры и времени воздействия:

$$\ln \left(\frac{\sqrt{h}}{6} \cdot \frac{K}{\tau - (77 - 0.086 \cdot T)} \right) = 2.01 - \frac{1730}{T}. \quad (3)$$

Таблица 1. Зависимость скорости обугливания от температуры из [5]

T, К	1/T*1000	T, мин	K, мм/мин	Ln(K)
920	1,08	0	1,45	0,37
810	1,23	6	1,1	0,1
740	1,35	12	0,78	-0,25
610	1,64	22	0,48	-0,37
670	1,49	21	0,48	-0,73
740	1,35	14	0,8	-0,22
820	1,22	2	0,7	-0,36
880	1,14	0	0,87	-0,14
1070	0,93	0	1,53	0,43

При получении соотношения, на первый взгляд, кроме математических, были допущены следующие ошибки:

– к п. 2): Если коэффициент корреляции получен на основании представленной табл. 1 [5] по всем представленным данным, то он равен не 0,91, а 0,81.

– к п. 3): Если коэффициенты аппроксимации получены методом наименьших квадратов на основании представленной табл. 1, то аппроксимационная функция выглядит не $Ln(K) = 2.01 - 1730/T$, а $Ln(K) = 1.649 - 1401/T$.

– к п. 4): Как можно видеть из табл. 2, скорости обугливания от толщины конструкции зависят достаточно заметно. При этом очевидно, что за 30 мин стандартного температурного режима пожара успеет обуглиться только небольшая часть конструкции и процесс будет протекать как в массиве бесконечной толщины.

Таблица 2. Зависимость скорости обугливания от толщины конструкции, вычисленная по формуле (3) при 30-минутном стандартном режиме пожара

h, мм	100	120	160	200	500
K, мм/мин	0,77	0,71	0,61	0,55	0,35

Следует заметить, что на начальных этапах прогрева элементов конструкций из негорючих материалов, при $Fo \leq 0.7$, с точностью, достаточной для инженерных расчётов, пользуются формулами для расчёта прогрева полубесконечного массива [6]. Для проведения оценочных расчётов числа Фурье в табл. 3 приведены теплофизические свойства сосны и древесного угля. Времена, за которые число Фурье для разных толщин достигает значения 0,7, представлены в табл. 4. Как видно из таблицы, эти времена значительно превосходят время сквозного прогорания конструкций, из чего можно заключить, что для конструкций без сквозных прогаров процесс будет происходить в основном при условии термически толстого слоя и скорость от толщины конструкции зависеть не будет.

Таблица 3. Теплофизические свойства сосны и древесного угля

Материал	Древесина сосны [1]	Уголь древесный [7]
Средняя плотность, кг/м ³	500	200
Коэффициент теплопроводности, $\lambda / (i \cdot \hat{E})$	0,17	0,0673
Удельная теплоёмкость, $\tilde{c} / (\hat{e} \cdot ^\circ C)$	1100	836
Температуропроводность, i^2 / \tilde{n}	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$

Таблица 4. Времена достижения $Fo \leq 0.7$ при прогреве конструкций

h, мм	Время, час	
	Древесина сосны	Древесный уголь
36	0,8	0,6
100	6,1	4,7
200	24,4	18,9
300	55,0	42,5
400	97,8	75,6
500	152,8	118,1

Можно определить происхождение поправочного коэффициента $\sqrt{h/36}$ в формуле (3). Вероятно, он введён на случай большого времени обугливания. В работе [8] описан получивший ещё в 50-х гг. широкое распространение в технике экспериментально-теоретический метод, позволяющий обобщать результаты единичного эксперимента. Метод

исходит из того, что тождественность температурных полей двух геометрически подобных конструктивных элементов при одинаковых начальных температурных условиях достигается при равенстве критериев Фурье. Критерий Фурье представляет собой следующее отношение:

$$Fo = \frac{a\tau}{r^2},$$

где a – коэффициент теплопроводности в м²/час; τ – длительность действия температуры в часах; r – геометрический параметр, характеризующий размер образца.

При тождественных температурных полях:

$$\frac{a_M \tau_M}{r_M^2} = \frac{a_H \tau_H}{r_H^2},$$

где индекс «м» означает модель, «н» – натуру.

В качестве модели применяют образец меньшего сечения, а натурального образца – большего сечения. Время, в течение которого должна нагреваться модель для достижения тождественности температурных полей с натурным образцом:

$$\tau_i = \tau_i \frac{a_M}{a_H} \left(\frac{r_H}{r_M} \right)^2.$$

Для конструктивных элементов, изготовленных из одинаковых материалов:

$$\tau_i = \tau_i \left(\frac{r_H}{r_M} \right)^2. \quad (4)$$

Из уравнения следует, что время, необходимое для достижения тождественных температурных полей в модели и натурном образце, прямо пропорционально отношению квадратов параметров, характеризующих их размер поперечного сечения. Например, для стен или перегородок в качестве параметра принимают толщину, для колонн – диаметр или радиус и т.п. Влияние резких колебаний температуры в условиях пожара критериальные уравнения не учитывают. Анализ экспериментальных данных, проведенный в работе [8] показал, что показатель степени находится в пределах 1,5–1,7. Для случая термически тонких объектов показатель степени находится в пределах 1,4–1,8 [9].

В более общем виде формула (4) выглядит следующим образом:

$$\tau_i = \tau_i \left(\frac{r_i}{r_i} \right)^n.$$

Подставив $r_M = v_M \cdot \tau_M$, $r_H = v_H \cdot \tau_H$, получим:

$$\frac{v_M}{v_H} = \left(\frac{r_H}{r_M} \right)^{n-1},$$

где $n=1,5$, исходя из работ [10], [5], [11]; $n=1,5-1,7$, исходя из экспериментальных данных [8]; $n=1,4-1,8$, исходя из экспериментальных данных [9].

Рассмотрим случай воздействия 30-минутного стандартного температурного режима пожара. Среднеинтегральная температура T равна 966 К. При $A=2,01$, $B=1730$ и значениях степени n от 1,4 до 1,8 критерия подобия формула (3) принимает вид:

$$\frac{H}{\tau} = \left(\frac{36}{h} \right)^{n-1} \cdot \exp(0.231).$$

Зависимость скорости обугливания древесины от толщины h и показателя степени n приведена в табл. 5. Как видно, скорость обугливания в диапазоне 36 (дверь, перегородка) – 200 (стена) меняется от двух до четырёх раз. Изменение степени n тоже существенно влияет на скорость обугливания.

Таблица 5. Зависимость скорости обугливания древесины от толщины h и степени n

h, мм	n		
	1,4	1,5	1,8
36	1,26	1,26	1,26
100	0,84	0,76	0,56
200	0,63	0,53	0,32
300	0,54	0,44	0,23
400	0,48	0,38	0,18
500	0,44	0,34	0,15

– к п. 5): Экспериментальных данных, на основании которых построена формула $\tau_0 = (77 - 0.086 \cdot T)$, не представлено.

– к п. 6): Не определена нижняя температурная граница соотношения: при $T=273$ К $\ln\left(\frac{\sqrt{h}}{6} \cdot \frac{H}{\tau - 53.5}\right) = -4.33$, $H = \frac{0.08}{\sqrt{h}}(\tau - 53.5)$, то есть по приведённой формуле при 0°C через 53,5 мин древесина начинает обугливаться со скоростью $0.08/\sqrt{h}$ мм/мин.

В комплексной методике определения очага пожара [10] на основе модели обугливания [5] предложена методика расчёта ориентировочных температуры и времени нагрева (T и $\tau_{\text{общ}}$) по изменению физико-химических свойств получающихся углей и глубине обугливания древесины. Под температурой нагрева здесь подразумевается среднеинтегральная температура. Изменение физико-химических свойств угля и зависимость скорости обугливания древесины описаны системой уравнений:

$$\begin{cases} \ln \frac{10 - P}{P \cdot \tau_0} = 4.16 - \frac{6270}{T} \\ \ln \frac{bH}{\tau - \tau_0} = 2.01 - \frac{1730}{T} \end{cases}$$

где P – десятичный логарифм от удельного электросопротивления пробы угля; H – глубина обугливания древесины, мм; τ_0 – «индукционный период», то есть период времени, который проходит до момента, от которого процесс обугливания вглубь начинает идти со скоростью, близкой к постоянной; b – коэффициент, который введён с целью учёта влияния толщины конструкции на кинетику процесса обугливания и рассчитывается по формуле: $b = \sqrt{h}/6$; h – исходная толщина элемента конструкции в направлении действия теплового потока, мм; $\tau_0 = \tau - \tau_0$ – ориентировочная продолжительность пламенного горения, мин.

Решение этой системы позволяет по результатам измерения глубины обугливания древесины в выбранной точке и исследованием отобранного в этой точке угля определять неизвестные параметры процесса обугливания – ориентировочную среднеинтегральную температуру и ориентировочную продолжительность горения древесины. Чтобы учесть время, необходимое для выгорания угля, предложена формула:

$$\tau_y = \Delta H_y \cdot \exp \frac{690}{T},$$

где ΔH_y – толщина выгоревшего слоя угля.

Общее время теплового воздействия в месте отбора пробы находится по формуле:

$$\tau_{\text{ОБЩ}} = \tau_{\text{д}} + \tau_0 + \tau_y.$$

При этом предполагается, что заметное выгорания угля начинается после завершения пиролиза древесины, то есть усадкой сечения при обугливания пренебрегается.

Достоинством изложенной методики является возможность получения аналитического решения. Кроме того, методика органически содержит в себе все недостатки модели [5], что ставит под сомнение точность получаемых результатов. Поэтому правомерность применения приближенного способа при определении времени и температуры воздействия по обугливанию древесины вызывает сомнения из-за недостоверности получаемых результатов, тем более что полученные результаты предлагается использовать для реконструкции динамики пожаров в помещениях.

Модель обугливания древесины при нестандартном огневом воздействии разработана Hadvig'ом [1]. Предположено, что скорость обугливания при реальном пожаре зависит от интенсивности воздействия пожара. Интенсивность воздействия в помещении зависит от пожарной нагрузки и проёмности помещения. Пожарная нагрузка равна:

$$q = k \cdot \frac{Q}{A_i},$$

где q – пожарная нагрузка, МДж/м²; Q – суммарная низшая теплотворная способность материалов в помещении, МДж; A_i – общая внутренняя поверхность помещения (пол, стены, потолок, окна и двери), м²; k – коэффициент ограждения [безразмерный], по табл. 6.

Проектный фактор проёмности равен:

$$F' = \frac{A\sqrt{h}}{A_i},$$

где F' – проектный фактор проёмности, м^{1/2}; A – общая площадь окон, дверей и других проёмов в стенах, м²; h – средневзвешенная высота вертикальных проёмов с учётом площадей проёмов, м. Простановка размеров помещения приведена на рис. 1.

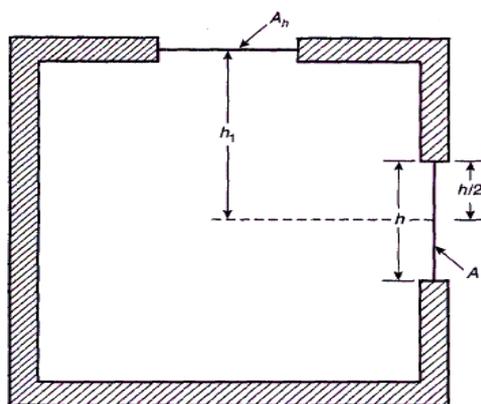


Рис. 1. Эскиз вертикального сечения вентилируемого помещения [1]

Таблица 6. Величина коэффициента ограждения k [1]

Тип ограждений	Фактор проёмности F'					
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
B	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
C	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5
D	1,35	1,35	1,35	1,50	1,55	1,65
E	1,65	1,50	1,35	1,50	1,75	2,00
F	1,0–0,5	1,0–0,5	0,8–0,5	0,7–0,5	0,7–0,5	0,7–0,5
G	1,50	1,45	1,35	1,25	1,15	1,05
H	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5

где А – ограждение помещения из кирпичей, бетона и газобетона; В – бетон, включая бетон на полу; С – газобетон (500 кг/м³); D – 50 % бетон, 50 % газобетон (500 кг/м³); E – 50 % газобетон (500 кг/м³), 33 % бетон и 17 % многослойного покрытия, состоящего из 13 мм штукатурного листа (500 кг/м³), 10-см минеральный мат (50 кг/м³) и кирпич (1800 кг/м³); F – 80 % стальная плита, 20 % бетон; G – 20 % бетон, 80 % покрытия, состоящего из двух штукатурных плит (2×13мм) (790 кг/м³); H – стальная плита на одной из сторон 100 мм минерального мата (50 кг/м³).

Расчётный фактор проёмности:

$$F = F' \cdot k \cdot f,$$

где f – безразмерный коэффициент горизонтальных проёмов.

Безразмерный коэффициент f увеличивает фактор проёмности при наличии горизонтальных проёмов. При наличии только вертикальных проёмов $f=1$. При наличии горизонтальных проёмов значение f определяется по диаграмме, приведённой на рис. 2.

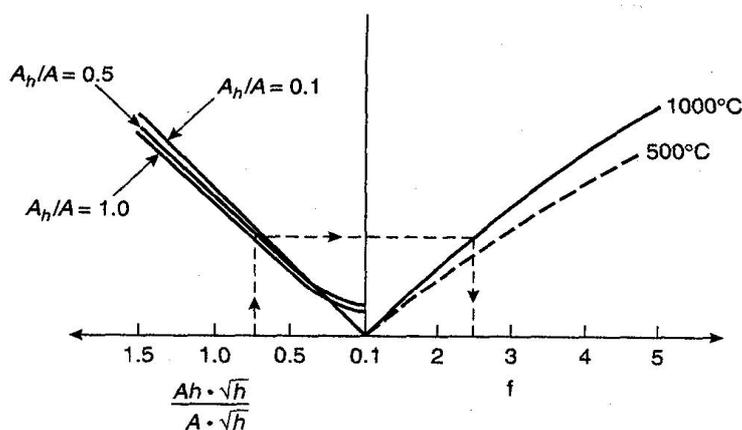


Рис. 2. Диаграмма для определения параметра f для температурного воздействия 500 ° и 700 °С [1]

Уравнения Навиг'а имеют вид:

$$\theta = 0.0175 \cdot \frac{q}{F}, \quad (5)$$

$$\beta_o = 1.25 - \frac{0.035}{F + 0.021} \text{ для } 0.02 \leq F \leq 0.30, \quad (6)$$

$$X = \beta_o \cdot \tau \text{ для } 0 \leq \tau \leq \frac{\theta}{3}, \quad (7)$$

$$X = \beta_o \left(-\frac{1}{12}\theta + \frac{3}{2}\tau - \frac{3}{4}\frac{\tau^2}{\theta} \right) \text{ для } \frac{\theta}{3} \leq \tau \leq \theta, \quad (8)$$

где θ – время, за которое максимальное обугливание достигнет величин, соответствующих F и q , мин; β_o – начальная скорость обугливания, мм/мин; X – глубина обугливания, мм; F – проектный фактор проёмности, $m^{1/2}$; q – проектная пожарная нагрузка, МДж/м²; τ – время, мин.

Эти уравнения верны при времени огневого воздействия менее 120 мин и помещений с пожарной нагрузкой из древесины. Пластик горит более интенсивно и более короткое время, чем дерево. Когда горючая нагрузка в помещении – пластик, принимается большая скорость обугливания (β_o на 50 % выше), более короткое время максимального обугливания (θ делится пополам), уравнение (5) действительно при $\tau < \theta$.

Уравнения (5–8) применимы для клееной древесины с плотностью 470 кг/м³, включая влажность 10 % при минимальной толщине 80 мм или квадратных элементов 50×50 мм. Уравнения (7, 8) справедливы только для случаев $0 < X < b/4$, где b – величина меньшей стороны прямоугольного элемента.

Для элементов неквадратного сечения с размерами от 30 до 80 мм соотношение размеров должно быть большим или равным 1,7, глубина обугливания, перпендикулярная широкой стороне, принимается X , перпендикулярная узкой стороне определяется $X \cdot (1.35 - 0.0044 \cdot b)$, где b – размер узкой поверхности.

Д. Драйздейл в своей книге [9] отмечал, что существует зависимость скорости обугливания древесины от теплового потока:

$$v = 2.2 \cdot 10^{-2} \cdot I, \quad (9)$$

где v – зависимость скорости обугливания, мм/мин; I – величина теплового потока, воздействующего на древесину, кВт/м².

Формула (9) применима для оценки максимальной глубины обугливания при температурных воздействиях, не сводимым к рассмотренным выше. Зависимость скорости обугливания от сорта древесины, влажности и толщины образца в данной формуле не учитываются.

Таблица 6. **Время до начала обугливания и средняя скорость обугливания деревянных конструкций с различными средствами огнезащиты [13]**

Средство огнезащиты	Толщина, мм	τ_0 , мин	v_{cp} , мм/мин за время, мин	
			30	45
Без огнезащиты	–	4	0,73	0,65
Плита цементно-силикатная Promatect-I	10	15,5	0,67	0,61
	20	35,5	0,58	0,54
	30	60,8	0,52	0,49
Плита вермикулитовая ПВТН	10	16,0	0,52	0,49
	20	38,5	0,4	0,38
	30	68,9	0,32	0,31
	40	106,7	0,3	0,29
Плита базальтоволокнистая ПНТБ	20	33,0	0,4	0,38
	30	53,1	0,33	0,31
	40	73,2	0,3	0,29
Плита минераловатная CONLIT-150	20	35,2	0,43	0,39
	30	54,5	0,36	0,32
	40	74,3	0,32	0,3

При проектировании в СССР деревянных строительных конструкций скорость обугливания рекомендовалось принимать равной 0,7 мм/мин для элементов сечением 120x120 мм и более и 1 мм/мин – для элементов сечением менее 120x120 мм [12]. В табл. 6 приведены экспериментальные данные из работы [13]: значения времени до начала обугливания и средняя скорость обугливания деревянных конструкций с различными видами огнезащиты. Как видно из таблицы, средняя скорость обугливания под слоем негорючей огнезащиты заметно ниже значений, приведённых в пособии [12].

В результате обзора следует заключить, что на настоящее время развитие получили методы оценки максимальных глубин обугливания для проектирования строительных конструкций с требуемыми пределами огнестойкости. Определение точного времени обугливания конкретного образца по заданной глубине затруднительно из-за сложности учёта влияния всех факторов, влияющих на его скорость обугливания.

Литература

1. Robert H. White Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members / SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
2. Проектирование, испытание и оценка огнестойкости противопожарных дверей. Рекомендации. М.: ВНИИПО, 1990. 90 с.
3. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1985. 216 с.
4. Пособие по определению пределов огнестойкости, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП И-2-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1985. 58 с.
5. Исследование процесса обугливания древесины при горении и изучение свойств обугленных остатков И.Д. Чешко [и др.] // Химия древесины. 1986. № 26. С. 89–93.
6. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1986. 37 с.
7. Эллисон В.А. Пожарная профилактика. М.: Изд-во НКВД, 1931. 262 с.
8. Ройтман М.Я. Пожарная профилактика в строительном деле. М.: Изд-во Мин-ва коммун. хоз. РСФСР, 1954. 304 с.
9. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
10. Комплексная методика определения очага пожара. Л.: Лен. филиал ВНИИПО МВД СССР, 1987. 114 с.
11. Roberts A.F., Clough I. In 9 th Intern. Symp. On Combustion. Pittsburg (Penn.), 1963. P. 158–164.
12. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП И-2-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1985. 56 с.
13. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и её пожароопасные свойства: монография. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2010. 262 с.

