

УДК 614.849

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.002

О ВЫСОТЕ ФАКЕЛА ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

*Мальчиков К.Б.; Кожевин Д.Ф., к.т.н., доцент; Коробейникова Е.Г., к.х.н., доцент
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*

Аннотация. В работе отражено влияние различных факторов на величину высоты факела пламени твердых горючих веществ и материалов, а также необходимость разработки методики определения данного геометрического параметра. Существующие методики определения геометрических параметров пожаров объективно отражают только процесс горения горючих газов и жидкостей, так как высота факела пламени таких пожаров зависит от характерных размеров очага пожара и скорости поступления горючего компонента в реакционную зону горения, которые остаются относительно постоянными с течением продолжительного времени. Процесс горения твердых веществ и материалов более сложен, чем горение жидкостей и газов, вследствие чего удельная массовая скорость выгорания, а, соответственно, и высота факела пламени таких веществ не постоянны и зависят от множества дополнительных факторов.

Ключевые слова: высота факела пламени, открытые пожары, твердые вещества и материалы, удельная массовая скорость выгорания.

ABOUT THE HEIGHT OF THE FLAME TORCH WHEN BURNING SOLID COMBUSTIBLE SUBSTANCES AND MATERIALS

*Malchikov K.B.; Kozhevnikov D.F., Ph.D. of Engineering Sciences, Docent;
Korobeynikova E.G., Ph.D. of Chemical Sciences, Docent
Saint Petersburg State University of the Ministry of Emergency Situations of Russia*

Abstract. The paper reflects the influence of various factors on the height of the flame of solid combustible substances and materials, as well as the need to develop a method for determining this geometric parameter. Existing combustion methods for determining the geometric parameters of fires objectively reflect only the combustion process of combustible gases and liquids, since the height of the flame of such fires depends on the characteristic size of the fire source and the rate of entry of the combustible component in the reaction zone of combustion, which remain relatively constant over a long time. Combustion process of solid substances and materials is more complex and multi-faceted, so that the specific mass burn-up rate, and, accordingly, the height of the flame of such substances are not constant and depend on many additional factors.

Key words: height of the flame, open fires, solid substances and materials, the mass rate of burning out.

В настоящее время существуют различные методики определения высоты факела пожара, позволяющие с достаточной точностью рассчитать данный геометрический параметр пожаров горючих жидкостей или газов. В соответствии с этими методиками считается, что высота факела пламени пожара зависит от характерного размера очага пожара, величины удельной массовой скорости выгорания или расхода горючего компонента [1-6].

Применение таких методик справедливо в случае описания процесса горения газов и жидкостей, так как высота факела в данном случае будет зависеть в основном от скорости поступления горючего компонента

к зоне пламенного горения. При горении жидкости тепловой поток излучения, поступающий к поверхности от зоны пламени, расходуется только на нагрев и испарение горючей жидкости, а в случае горения конденсированных твердых горючих веществ и материалов (далее – ТГМ), часть теплоты от реакционной пламенной зоны, кроме того, тратится на термическое разложение материала. Горение ТГМ, например древесины, имеет дополнительные особенности, а именно образование в процессе горения на ее поверхности слоя твердого углистого остатка или кокса. Образование углистого слоя, его последующее выгорание в результате гетерогенного тления, в конечном счете, очень сильно влияет на скорость поступления газообразных горючих продуктов термического разложения в зону горения, то есть на величину удельной массовой скорости выгорания вещества или материала. В свою очередь, массовая скорость выгорания является промежуточным показателем при вычислении величины пожарных рисков на объектах защиты [7;8].

Ввиду того, что достаточное количество теплоты от пожара ТГМ посредством излучения расходуется на термическое разложение материала, удельная массовая скорость выгорания древесины будет значительно меньше, чем аналогичный показатель для горючей жидкости. Например, средняя справочная удельная массовая скорость выгорания древесины составляет 0,0138-0,015 кг/м²·с, а средняя удельная массовая скорость выгорания горючих жидкостей, например, нефти - 0,0231 кг/м²·с, керосина - 0,0444 кг/м²·с, бензола - 0,459 кг/м²·с, а бензина - 0,0541 кг/м²·с соответственно. То есть массовая скорость выгорания ТГМ может быть в 2-3 раза меньше массовой скорости выгорания горючей жидкости.

Массовая скорость горения ТГМ существенно зависит и от других условий, при которых протекает процесс горения. Основными из них, кроме уже названной особенности, являются такие теплофизические свойства ТГМ как влажность материала, его плотность, геометрическая толщина, волнистость, а также величина удельной поверхности, температурный режим пожара и количество ТГМ, приходящегося на единицу площади размещения. Методика определения массовой скорости выгорания ТГМ в настоящее время отсутствует в нормативной и справочной литературе.

На рис. 1 показана потеря веса при горении древесины различной влажности. По своей физической сущности, скорость потери веса древесины при ее термическом разложении эквивалентна массовой скорости выгорания. Из графика видно, что с уменьшением влажности древесины увеличивается скорость ее выгорания [9].

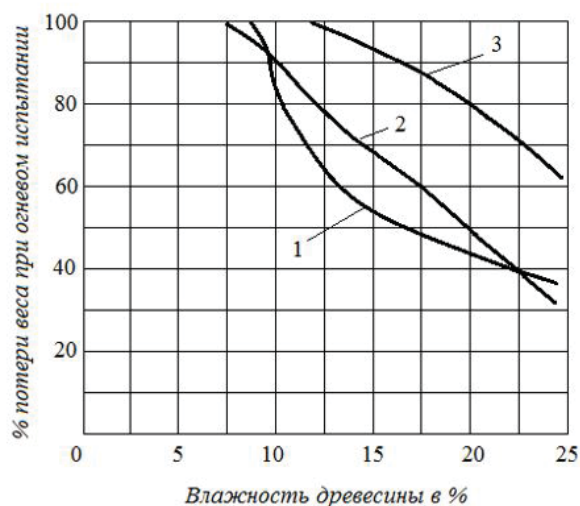


Рис. 1. Изменение скорости горения древесины от влажности:
1 – ель ($\rho = 550 \text{ кг/м}^3$); 2 – дуб ($\rho = 770 \text{ кг/м}^3$); 3 – бук ($\rho = 720 \text{ кг/м}^3$)

Удельная массовая скорость выгорания древесины зависит от ее плотности. На рис. 2 представлена потеря веса при горении древесины различной плотности. Из графика видно, что с уменьшением плотности древесины увеличивается скорость ее выгорания. Для более плотного или конденсированного материала требуется больше тепловых затрат для его прогрева [9].

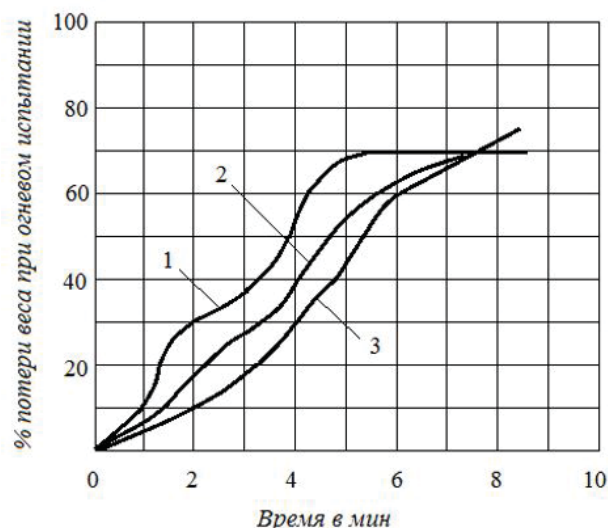


Рис. 2. Изменение скорости горения древесины от плотности:
1 – $\rho = 350 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 540 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho = 620 \text{ кг/м}^3$

На величину удельной массовой скорости выгорания древесины влияет ее толщина. При увеличении толщины образца древесины в пределах термически тонких образцов снижение линейной скорости и, как следствие, массовой скорости выгорания, происходит, главным образом, вследствие увеличения потерь тепла на прогрев материала вглубь. Для термически толстых образцов, например, древесины в виде бревен на лесоскладах, а складирование таких материалов на открытой территории занимает огромные объемы, можно данной зависимостью пренебречь, считая, что в потенциальном горении такой древесины участвует геометрически толстый материал. Если геометрическая или физическая толщина превышает термическую, дальнейшее увеличение толщины не приводит к изменению температуры материала по глубине и, как следствие, уменьшению скорости горения материала, которая будет постоянной.

На величину удельной массовой скорости выгорания древесины влияет ее неоднородная теплопроводность, обусловленная природой строения данного ТГМ (анизотропностью). Теплопроводность древесины вдоль волокон выше, чем поперек их. Для сосновой древесины теплопроводность поперек волокон составляет $0,628 \text{ кДж/м}\cdot\text{град}\cdot\text{час}$, а вдоль волокон $1,256 \text{ кДж/м}\cdot\text{град}\cdot\text{час}$. В связи с этим разложение элемента древесины (при одинаковых условиях нагрева) с торца происходит на большую глубину, чем с боковой поверхности.

ТГМ в зависимости от формы и объема имеют различную удельную поверхность. В связи с этим скорость восприятия ими тепла, следовательно, и скорость прогрева, разложения и горения также различны и зависят от этой величины. Чем больше для ТГМ величина отношения поверхности к объему, тем быстрее оно прогревается, воспламеняется и с большей скоростью горит. Как следствие, практическое определение массовой скорости выгорания ТГМ очень затруднительно. На рис. 3 приведена зависимость величины потери веса при горении деревянных брусков различного поперечного сечения. Изменение потери веса материала можно принять как изменение скорости его горения. Наибольшую скорость выгорания имеет брусок $1 \times 1 \times 10 \text{ см}$, его удельная поверхность составляет $4,02 \text{ см}^{-1}$. Наименьшую скорость выгорания имеет брусок размером $4 \times 4 \times 10 \text{ см}$, величина удельной поверхности у которого в 4 раза меньше (1 см^{-1}). Это подтверждается и практикой пожаротушения, которая показывает, что бревенчатые стены горят с меньшей скоростью, чем каркасные [9].

В связи с вышеизложенным, предлагается использовать при расчете интенсивности тепловыделения пожара, величина которой в дальнейшем необходима для расчета высоты факела пламени пожара, не просто площадь поверхности горячего, а удельную площадь поверхности горячего. Величина площади поверхности горячего достаточно легко рассчитывается по геометрическим параметрам очага пожара, то есть по площади геометрической проекции поверхности горения на горизонтальную плоскость, но это не отражает реальной картины тепловыделения от пожара древесины, хранящейся, например, в штабелях на лесоск-

ладах. Удельная площадь поверхности такого материала значительно больше величины его поверхности, но рассчитать ее, в большинстве случаев, просто невозможно, введу хаотичности расположения материала относительно друг друга. В данном случае, необходимо провести дальнейшие экспериментальные исследования, в частности, вывести эмпирические повышающие коэффициенты для расчета интенсивности тепловыделения от пожара древесных материалов с учетом удельной поверхности горения.

В связи с вышеизложенным, предлагается использовать при расчете интенсивности тепловыделения пожара, величина которой в дальнейшем необходима для расчета высоты факела пламени пожара, не просто площадь поверхности горючего, а удельную площадь поверхности горючего. Величина площади поверхности горючего достаточно легко рассчитывается по геометрическим параметрам очага пожара, то есть по площади геометрической проекции поверхности горения на горизонтальную плоскость, но это не отражает реальной картины тепловыделения от пожара древесины, хранящейся, например, в штабелях на лесоскладах. Удельная площадь поверхности такого материала значительно больше величины его поверхности, но рассчитать ее, в большинстве случаев, просто невозможно, введу хаотичности расположения материала относительно друг друга. В данном случае, необходимо провести дальнейшие экспериментальные исследования, в частности, вывести эмпирические повышающие коэффициенты для расчета интенсивности тепловыделения от пожара древесных материалов с учетом удельной поверхности горения.

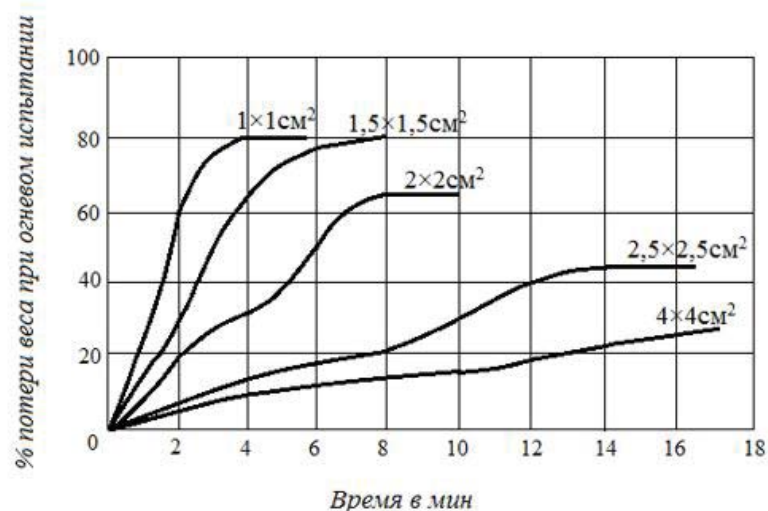


Рис. 3. Изменение скорости горения деревянных брусков от их поперечного сечения

В лабораторных условиях, например, в камер-весах, определяется удельная действительная массовая скорость выгорания ТГМ, то есть массовая скорость выгорания с единицы площади поверхности горения, а не площади горения (приведенная удельная массовая скорость выгорания). Но данная величина определена для лабораторного образца ТГМ, имеющего относительно малую величину площади поверхности, а само определение данной величины проводится в муфельной печи, обычно поддерживающей температуру от 280 до 800 оС [10]. Температурный режим на открытом пожаре значительно выше, а это означает, массовая скорость горения (табл.1) и величина тепловыделения будут в реальных условиях пожара выше. Аналогичным образом будет меняться и высота факела пламени. Максимальная высота факела пламени будет наблюдаться на начальном этапе горения древесины, когда выход летучих компонентов термического разложения и температура на пожаре максимальны, образование углистого слоя минимально, а количество сгоревшей древесины составляет чуть более 50 % от ее полной массы [11].

Таблица 1. Удельная массовая скорость выгорания древесины влажностью 10 %

Горючий материал	Удельная массовая скорость выгорания, кг/м² с, при оС		
	500	700	900
Древесина (W=10 %)	0,0056	0,0075	0,0108

Достаточно заметное влияние на величину массовой скорости горения ТГМ также оказывает количество горючего, сосредоточенного на единице площади. При увеличении загрузки горючего на единице площади скорость горения вещества немного повышается. При количестве древесины 25 кг/м² средняя скорость горения равна 50 кг/м²·час (0,0138 кг/м²·с), а при количестве 50 кг/м² скорость горения – 52 кг/м²·час (0,0144 кг/м²·с). Незначительно повышается и температура пожара. На рис.4 показано среднее изменение температуры пожара в зависимости от количества древесины, приходящейся на 1 м² площади ее размещения [9].

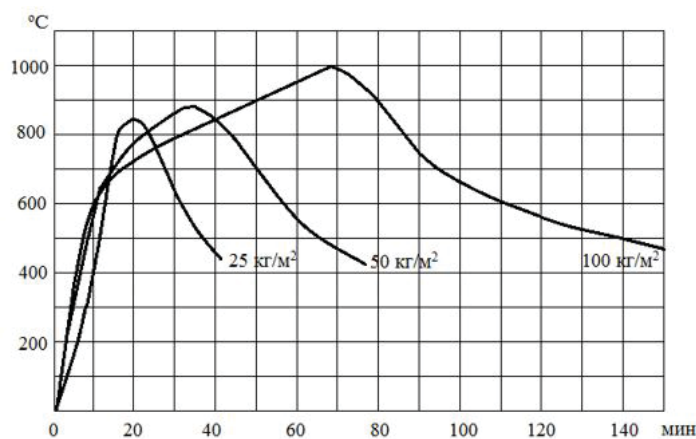


Рис. 4. Температурный режим пожара в зависимости от размещенного на площади количества древесины

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать вывод, что удельная массовая скорость выгорания ТГМ зависит от множества факторов. В свою очередь, величина теплового потока от пожара зависит от скорости поступления горючего компонента во фронт пламени. Существуют методики определения высоты факела пламени пожара с помощью величины интенсивности теплового потока от пожара, которая зависит от величины низшей теплоты сгорания вещества или материала [2-6].

Величина низшей теплоты сгорания древесины также не имеет постоянной величины и зависит не только от условий горения (например, от доступа кислорода), но и от некоторых других дополнительных факторов, которые будут изложены далее.

Во-первых, на величину теплоты сгорания влияет состав древесины, который не является постоянным даже для древесины одной породы или вида, и зависящий от условий произрастания данного растительного материала. Усредненный процентный элементный состав древесины, определенный в условиях аналитической лаборатории, представлен в табл.2 [11].

Таблица 2. Средний элементный состав древесины

Горючий материал	Элементный состав, %				Содержание влаги и золы, %	
	C	H	O	N	W	A
Древесина:						
дуб	46,08	5,50	38,18	1,14	7,0	2,1
сосна	46,00	5,50	39,2	0,90	7,0	1,4

Во-вторых, древесина является природным пространственно сшитым полимером, состоящим из различных компонентов, основными из которых являются целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза и экстрактивные вещества. Выход газообразных летучих продуктов, образующихся при термическом разложении этих компонентов, зависит от температуры и режима нагревания древесины. При низких температурах преобладает образование диоксида углерода и водяного пара, при более высоких образуются горючие газы. В табл.3 приведен примерный состав неконденсирующихся газов, образующихся при различной температуре разложения древесины [11].

В соответствии с табличными данными, суммарное количество выделяемого тепла при сгорании 1 кг абсолютно сухой древесины составляет 18 343,3 кДж/кг. Содержание в древесине значительного количест-

ва кислорода, влаги, образование в результате термического разложения большого количества негорючих веществ (около 30 % от образовавшихся продуктов термического разложения приходится на углекислый газ и пары воды) и продуктов неполного окисления (угарный газ) при химическом недожоге, объясняет относительно низкую величину низшей теплоты сгорания древесины.

Таблица 3. Состав неконденсирующихся газов, образующихся при различной температуре разложения древесины

Состав газов	Температура разложения древесины, °С					
	200	300	400	500	600	700
Выход газов на 100 кг древесины, м³	0,4	5,6	9,5	12,8	14,3	16,0
Состав, % (об.):						
углекислый газ CO ₂	75,0	56,07	49,36	43,20	40,98	38,56
угарный газ CO	25,00	40,17	34,00	29,01	27,20	25,19
метан CH ₄	-	3,76	14,31	21,72	23,42	24,94
этилен C ₂ H ₄	-	-	0,86	3,68	5,74	8,50
водород H ₂	-	-	1,47	2,34	2,66	2,81

В табл.4 приведен полный состав продуктов, образующихся при термическом разложении древесины [11].

Таблица 4. Теплота сгорания продуктов сухой перегонки древесины

Продукты сухой перегонки березовой древесины	Выход на 100 кг абсолютно сухой древесины (В), кг	Теплота сгорания, кДж	
		1 кг (z)	В (z)/100, кг
Уголь	31,80	32 154,6	10 225,0
Смола	15,80	29 642,5	4 683,5
Уксусная кислота C ₂ H ₄ O ₂	7,08	14 276,9	1 010,8
Метиловый спирт CH ₄ O	1,60	22 231,9	355,7
Ацетон C ₃ H ₆ O	0,19	32 489,5	61,7
Оксид углерода (IV) CO ₂	9,96	-	-
Оксид углерода (II)	3,32	10 173,9	337,7
Метан CH ₄	0,54	-	-
Этилен C ₂ H ₄	0,19	-	-
Разные органические вещества	10,03	16 202,9	1 668,9
Вода	19,49	-	-
Итого	110,00		18 343,3

Табличные данные по выходу продуктов термического разложения березовой древесины были получены в лабораторных условиях. Из представленных данных видно, что в результате термического разложения древесины образуется около 30 % угля или углерода. В условиях открытого пожара углерода образуется меньше – в среднем 20% от массы древесины. Часть образующегося углистого остатка не участвует в горении, за счет чего теплота сгорания древесины в условиях пожара будет несколько ниже.

Наличие несгоревшей части углерода при сгорании древесины объясняется механическим недожогом, обусловленным наличием в составе древесины золы или шлака (минеральной негорючей составляющей древесины). Помимо древесины, зола содержится также и в других природных органических ТГМ. Чем выше зольность, тем больше твердых частиц горючего вещества не сгорит вследствие обволакивания расплавленным шлаком, затрудняющим доступ к горючим компонентам древесины.

Кроме того, вследствие неравномерности диффузии поступающего к пламенной реакционной зоне окислителя, разбавления горючей смеси летучими продуктами разложения древесины и продуктами реакции горения, происходит снижение теплоты сгорания за счет химического недожога (особенно это заметно в верхней части факела пламени, в которой, как раз, наблюдается сажа) или, иными словами, происходит

образование продуктов неполного сгорания горючего. На величину химического недожога ТГМ приходится в среднем 3-5% от общего количества выделившейся теплоты [12;13].

Наличие влаги в волокнах древесины обуславливает снижение тепловыделения не только за счет расходования тепла на ее испарение из материала, но и за счет разбавляющего действия образующихся паров воды на горючую смесь, тем самым также способствуя химическому недожогу.

Если исключить из продуктов термического разложения уголь (углерод), которого в лабораторных условиях образовалось 31,8 %, то получится, что низшая теплота сгорания березовой древесины составит 8 117,7 кДж/кг [11]. Но ввиду того, что часть образующего углерода вступает в реакцию горения, особенно на открытых пожарах, теплоты выделится больше, но определить достаточно точное количество образовавшихся продуктов разложения в условиях открытого пожара невозможно. Поэтому для дальнейших расчетов целесообразно применить методику определения низшей теплоты сгорания, предложенную Д.И. Менделеевым (1897) (1). Для этого необходимо воспользоваться усредненными справочными данными по элементному составу древесины (табл.1), считая, что 20 % углерода, из которого состоит древесина, не вступит в реакцию горения в результате механического недожога, то есть из 46,08 % прореагирует около 36,87 % углерода.

Низшая теплота сгорания дубовой древесины усредненного элементного состава по формуле Д.И. Менделеева, с учетом средней величины механического недожога, будет составлять:

$$Q_{\text{гор}} = 339,4 \cdot \omega(C) + 1257 \cdot \omega(H) - 108,9 \cdot (\omega(O) + \omega(N) - \omega(S)) - 25,1 \cdot (9 \cdot \omega(H) + \omega(W)) = 339,4 \cdot 36,87 + 1257 \cdot 5,50 - 108,9 \cdot (38,18 + 1,14) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,50 + 7,0) \approx 13727 \text{ кДж/кг} \quad (1)$$

$\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(O)$, $\omega(N)$, $\omega(S)$, $\omega(W)$ – массовая доля углерода, водорода, кислорода, азота, органической серы, влаги в горючем веществе, %.

Вычисленное значение низшей теплоты сгорания дубовой древесины может быть использовано в дальнейших расчетах по определению высоты факела пламени данного ТГМ, несмотря на то, что данная величина может быть еще меньше, так как помимо механического недожога, необходимо учитывать и химический недожог образующихся летучих компонентов термического разложения древесины (сажи). Горение всегда сопровождается механическим и химическим недожогом одновременно. В расчетах средней величины теплоты сгорания древесины учтена величина механического недожога, связанная с образованием не участвующего зашлакованного углерода, а также величина химического недожога, связанная с образованием продуктов неполного сгорания, а именно угарного газа или монооксида углерода. Однако, необходимо учесть также и дополнительные тепловые потери, обусловленные образованием сажи, которое связано также с механическим недожогом (конвективный вынос частиц из пламенной зоны) и химическим недожогом (снижением концентрации окислителя в верхней части факела пожара и, как следствие, снижение теплового выделения и температуры пламени пожара). Для этих целей целесообразно при расчете интенсивности тепловыделения от пожара учитывать коэффициент недожога, составляющий для целлюлозных материалов величину 0,9-0,99. Например, методика расчета высоты факела пламени, предложенная Д. Драйздейлом и Кутом [4], не учитывает при расчете величины удельной теплоты пожара недожог горючего.

В соответствии с методикой определения высоты факела пламени Д. Драйздейла, при достаточно большой величине характерного размера очага пожара, высота факела пламени пропорционально величине интенсивности тепловыделения $0,2q^{2/5}$, то есть:

$$l_f = 0,20 \cdot Q_c^{2/5}, \text{ м} \quad (2)$$

l_f – высота факела пожара, м;

Q_c – интенсивность тепловыделения пожара, кВт;

Коэффициент 0,20 в данной методике, по-видимому, является долей теплоты, которая тратится на поддержание горения (термическое разложение ТГМ) и дальнейшее окисление образующихся летучих продуктов, то есть участвующей в формировании величины факела пламени. Остальная доля выделившейся теплоты, которая достигает значительной величины при открытых пожарах, удаляется от пламенной реакционной зоны с конвективными потоками и излучением в окружающую среду.

Интенсивность тепловыделения очага пожара (интенсивность пожара) рассчитывается следующим образом:

$$Q_c = m^{\parallel} \cdot \Delta H_c \cdot A_f \cdot Z, \text{ кВт} \quad (3)$$

$m^{\parallel}$ - массовая скорость выгорания, кг/м²·с;

ΔH_c - низшая теплота сгорания вещества (материала), кДж/кг;

A_f - площадь поверхности горючего, м²;

Z - коэффициент недожога для целлюлозных ТГМ (0,9-0,99).

Разработка методики определения высоты факела пламени ТГМ связано с необходимостью учета всех факторов, от которых зависит данный геометрический параметр, и которые, в свою очередь, оказывают большое и взаимное влияние друг на друга. Данное обстоятельство затрудняет разработку данной методики, однако, необходимо для объективного определения высоты факела пламени пожаров ТГМ.

Литература

1. Терехнев В.В., Подгрушный А.В. «Пожарная тактика. Основы тушения пожаров». Учебное пособие под общ. ред. М.М. Верзилина. М.: 2009. С.69.
2. Научно-технический журнал «Пожаровывобезопасность» 2012 г. том 21 № 2 «К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости» авт. Пузач С.В., Абакумов Е.С. С.33.
3. Иванов Е.Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты. – 2-е изд., доп. и перераб. М.: Химия, 1990. – 384 с.: ил. С.61.
4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. Бомштейна К.Г.; Под ред. Кошмарова Ю.А., Макарова В.Е. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.: ил. – Перевод изд.: An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – John Wiley and Sons, Chichester, 1985. С.135-149.
5. Материалы 8-ой Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015» «Анализ методов испытаний по устойчивости у огневому воздействию полимерных трубопроводов в автоматических установках пожаротушения» авт. Волков С.А., Есипович Д.Л., Дмитриченко А.С. С.65.
6. Иванов Е.Н. Пожарная защита открытых технологических установок. М., Химия, 1975. 200 с., 110 рис., 16 табл., список литературы 60 ссылок. С.21.
7. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» // Информационно-правовой портал «Гарант» <https://base.garant.ru/196118/> п.23 приложения № 3.
8. Свод правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 25.03.2009 № 182) » // Информационно-правовой портал «Гарант» <https://base.garant.ru/195520/> п.В.5.4 приложения В.
9. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ. Издательство коммунального хозяйства РСФСР, М., 1962. - 264 с. С.213-214.
10. Научно-технический журнал «Пожаровывобезопасность» 2012 г. том 21 № 8 «Эмпирические исследования по определению массовой скорости выгорания твердых горючих материалов на примере нефтяного кокса» авт. Бакиров И.К., Хафизов Ф.Ш. С.69-70.
11. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1981. – 272 с., ил. С.149-151.
12. Аникин Н.А., Дробышевская Н.И., Дудинов В.А., Коньков А.С., Конюхов С.М., Мещеринов Ф.И., Полецкий А.Т., Поляков Г.М., Сальников О.А., Чернобай Д.Г. Справочник для изобретателя и рационализатора. 3-е изд., испр. и доп. Государственной научно-техническое издательство машиностроительной литературы. М., 1962. - 791 с. С.234.
13. Лавров Н.В., Шурыгин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. Издательство Академии Наук СССР. М., 1962. – 215 с. С.135.