

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.5>

УДК 614.841.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЫМООБРАЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ ВИДИМОСТИ ПРИ ПОЖАРЕ**Суриков А.В., Лешенюк Н.С.**

Цель. Для различных типов материалов изучить зависимость величины коэффициента дымообразования, определенной по стандартизированной методике, от доли сгоревшего материала и длины волны оптического излучения, проходящего через задымленную среду при их горении, и разработать на основе полученных данных скорректированные методики определения величин коэффициента дымообразования и удельного выхода дыма.

Методы. Значения показателя ослабления оптического излучения и доли сгоревшего материала при определении его коэффициента дымообразования определялись экспериментально. Изменение времени потери видимости при пожаре определялось расчетным методом.

Результаты. Экспериментально получены величины показателя ослабления оптического излучения, проходящего через задымленную среду при горении 10 типов материалов, и определены значения коэффициента дымообразования, учитывающие долю массы сгоревшего материала и длину волны излучения. Установлена экспериментальная зависимость изменения показателя ослабления оптического излучения в диапазоне длин волн (400–1100) нм при горении 10 типов материалов. Экспериментально определены значения удельного выхода дыма 10 типов материалов. Показано, что при отсутствии учета доли массы сгоревшего материала и длины волны зондирующего излучения значение коэффициента дымообразования уменьшается до 2,6 раза, что приводит к увеличению расчетного значения времени наступления потери видимости при пожаре до 30 %. Скорректирована методика определения удельного выхода дыма при горении материалов.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть применены при моделировании пожаров и оценке уровня пожарной безопасности людей.

Ключевые слова: моделирование, видимость, дымообразующая способность, удельный выход дыма, показатель ослабления оптического излучения, длина волны зондирующего излучения, доля сгоревшей массы материала.

(Поступила в редакцию 11 января 2021 г.)

Введение

Пожары сопровождаются интенсивным выделением дыма, который является непосредственным объектом таких опасных факторов пожара, как ограниченная видимость и токсичность продуктов горения. Многолетний опыт моделирования пожаров и оценки их динамики показывает, что предельная видимость, как правило, наступает раньше других факторов. Этот фактор зависит от дымообразующей способности пожарной нагрузки, что определяет важность корректности ее учета при проектировании зданий и сооружений, разработке тактики пожаротушения и проведении спасательных работ.

В мировой практике (Европа, США) в качестве количественной характеристики дымообразующей способности материалов используется величина, называемая удельный выход дыма (soot yield) Y_s , которая равна отношению массы дыма m_d к массе сгоревшей пожарной нагрузки m_m [1].

Исходным (прямым) методом определения величины Y_s является метод контроля потока дымовых газов, который заключается в измерении массы дымовых частиц, осаждаемых на фильтре, через который прокачивается дым [2].

Вследствие сложности и трудоемкости данного метода для решения локальных практических задач применяются косвенные оптические методы определения Y_s , основанные на измерении ослабления оптического излучения, проходящего через дым. Как правило, прохождение оптического излучения при определении Y_s фиксируется на длине волны 632 нм [2; 3]. При этом испытательные установки предварительно калибруются по стандартным данным, получаемым прямым методом.

В Республике Беларусь в качестве показателя пожарной опасности веществ и материалов, определяющих их дымообразующую способность, применяется коэффициент дымообразования D_m .

Определение D_m основано на измерении максимального ослабления (показателя ослабления k) лазерного излучения с длиной волны 632 нм при его прохождении через дым и определяется по формуле:

$$D_m = \frac{V}{m_n l} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (1)$$

где D_m – массовый коэффициент дымообразования, м²/кг; V – объем измерительной камеры (0,512 м³), заполненной дымом, м³; m_n – начальная масса материала, кг (определяется площадкой размером 40×40 мм и толщиной материала не более 10 мм (для образцов пенопластов допускается толщина до 15 мм)); l – длина пути прохождения света через дым (0,8 м); I – интенсивность прошедшего света; I_0 – интенсивность падающего света¹.

При пламенном горении зависимость показателя ослабления от времени $k(t)$ имеет максимум вследствие выгорания образца материала с последующим проявлением процессов коагуляции и седиментации частиц дыма, приводящих к уменьшению концентрации частиц дыма и увеличению его прозрачности.

С учетом закона Бугера – Ламберта выражение (1) имеет вид:

$$D_m = \frac{Vk}{m_n}, \quad (2)$$

где k – показатель ослабления излучения в среде, м⁻¹.

Как показано в работе [4], величина D_m пропорциональна Y_s :

$$D_m = Y_s \sigma_s, \quad (3)$$

где σ_s – удельный массовый коэффициент экстинкции, м²/кг.

Однако выражение (3) будет справедливо только при полном сгорании испытуемого образца, т.к. при определении Y_s учитывается доля сгоревшего материала, идущего на образование дыма.

В ряде случаев в условиях испытаний по определению D_m наблюдается неполное сгорание исследуемых образцов при достижении максимального значения показателя ослабления k светового потока, принимаемого для расчета D_m согласно формуле (1). При неполном сгорании материалов значения Y_s , рассчитанные с использованием измеренной величины D_m , будут занижены. Это, несомненно, будет влиять на результаты расчета значений опасных факторов пожара, в частности, приведет к увеличению значения предельной видимости l_{np} в дыму. Следовательно, для корректного определения величины D_m необходимо в процессе испытаний устанавливать долю сгоревшего материала $A_{дсм}$.

При проектировании зданий и сооружений для расчета предельной видимости при пожаре l_{np} применяются интегральная, зонная и полевая модели развития пожара. Расчет значения l_{np} в данных моделях основан на определении концентрации дыма, при которой на соответствующем расстоянии объект наблюдения (например, эвакуационный выход) становится неразличимым. Значение l_{np} рассчитывается исходя из величины яркостного порога чувствительности человеческого глаза в условиях задымления.

При проведении расчетов задымления в помещении в интегральной модели в качестве значений дымообразующей способности пожарной нагрузки D , как правило, используется или база типовой пожарной нагрузки [5], или значения коэффициентов дымообразования различных материалов D_m , полученные в условиях испытаний по стандартизированной методике ГОСТ². В зонной и полевой модели развития пожара в качестве параметра пожарной нагрузки, характеризующего дымообразующую способность материала, применяется Y_s .

¹ Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-89. – Взамен ГОСТ 12.1.044-84; введ. 17.12.92. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – С. 74–76.

² См. сноску 1.

Прямое применение данных по D_m и Y_s (при определении D_m по стандартизированной методике ГОСТ и Y_s по формуле (3)) для расчета предельной видимости при пожаре l_{np} имеет методическую ошибку, связанную с длиной волны зондирующего излучения λ при определении D_m .

Основным моментом, который должен быть учтен при расчете видимости, является корректное применение значений удельного массового коэффициента экстинкции σ_s . Удельный массовый коэффициент экстинкции σ_s численно равен показателю ослабления оптического излучения при единичной массовой концентрации дыма. Он зависит от горящего материала и длины волны света, проходящего через дым λ [6].

Влияние изменения σ_s в зависимости от материала пожарной нагрузки на расчет предельной видимости рассмотрено в работе [7]. Результаты экспериментальных исследований по определению σ_s , полученные в семи различных научно-исследовательских лабораториях, систематизированы в работе [8]. В указанной работе представлены значения σ_s для 17 веществ и материалов при зондировании дыма, образованного при их горении, оптическим излучением с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. На практике для оценки видимости при пожаре применяется усредненное значение σ_s , равное $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ на длине волны $632,8$ нм с доверительным интервалом $\pm 1170 \text{ м}^2/\text{кг}$ и доверительной вероятностью 95 %. Данное значение принимается независимо от природы и происхождения материала [1; 9; 10].

Известно, что человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Наибольшая его чувствительность соответствует желто-зеленому цвету, т.е. диапазону длин волн $550\text{--}570$ нм. Эти значения соответствуют дневному зрению человека. В работе [11] установлено, что условия задымления соответствуют условиям сумеречного зрения. Этот вид зрения человека характеризуется смещением максимальной чувствительности глаза в голубую область спектра. При этом максимальное ее значение соответствует диапазону длин волн $505\text{--}515$ нм. Данное явление носит название эффекта Пуркинье. Зависимость относительной спектральной световой чувствительности глаза человека V от длины волны излучения λ приведена на рисунке 1 [12]. С учетом того что при определении предельной видимости расчет проводится для предельной чувствительности глаза, определение параметров дымообразования пожарной нагрузки с применением оптических методов необходимо проводить именно на длине волны зондирующего излучения, соответствующей максимальной чувствительности глаза.

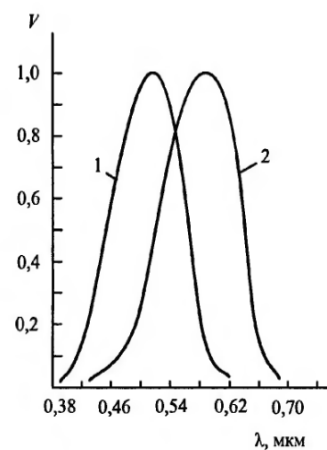


Рисунок 1. – Кривая видимости для сумеречного (1) и дневного (2) зрения

Так как величина предельной видимости l_{np} при задымлении определяется максимальной чувствительностью глаза для сумеречного зрения, т.е. при длине волны $\lambda = 505\text{--}515$ нм, при расчете l_{np} следует использовать значения коэффициента дымообразования D_m и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s , соответствующие данному диапазону длин волн излучения.

В данной работе описана скорректированная методика определения величины удельного выхода дыма Y_s , основанная на стандартизированной методике определения коэффициента дымообразования D_m и дополненная учетом доли сгоревшего материала $A_{осм}$ и значения удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от вида горящего материала. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости значений коэффициента дымообразования D_m и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от длины волны оптического излучения для различных типов пожарной нагрузки.

Основная часть

Учет доли сгоревшего материала при определении дымообразующей способности материалов. Экспериментальные исследования проводились на базе Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» на испытательной установке «Дым» (сертификат аккредитации рег. № ВУ/112 1.0102 от 19.03.1996)³.

³ См. сноску 1.

Методика измерений основывалась на регистрации в условиях стандартных испытаний максимального ослабления лазерного излучения, проходящего через дым, полученный при горении исследуемого материала, и соответствовала ГОСТ⁴. В качестве приемника излучения применялся фотодиод ФД-7К ($\Delta\lambda = 400\text{--}1100$ нм). Результаты измерений интенсивности лазерного излучения фиксировались каждые 3 с на персональном компьютере.

Для выбора исследуемых материалов были проанализированы результаты испытаний более 500 материалов, полученные на базе научно-исследовательских учреждений Министерства по чрезвычайным ситуациям [13]. По результатам анализа были определены материалы, при горении которых максимально ослабляется оптическое излучение, проходящее через образующийся при этом дым.

Для исследований были выбраны следующие материалы: древесина хвойных пород (далее – древесина), древесностружечная плита (далее – ДСП), древесно-волоконная плита средней плотности (далее – МДФ), фанера, ориентированно-стружечная плита (далее – OSB-плита), пенополистирол марки «ППТ» (далее – ППТ), поливинилхлорид (далее – ПВХ), полиэтилен (далее – ПЭТ), пенополиуретан (далее – ППУ), резина.

В процессе экспериментов испытания прекращались в момент достижения максимума поглощения оптического излучения. Образцы взвешивались до и после испытаний для определения доли сгоревшей массы $A_{дсм}$. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты измерений доли сгоревшего материала

Материал	Средняя начальная масса, г	Средняя сгоревшая масса, г	Средняя доля сгоревшего материала, отн. ед.
ППУ	$0,65 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
ПВХ	$3,37 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,01$
Фанера	$3,65 \pm 0,01$	$3,44 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,01$
Древесина	$3,55 \pm 0,01$	$3,10 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,01$
МДФ	$7,30 \pm 0,01$	$5,86 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,01$
ДСП	$3,28 \pm 0,01$	$2,79 \pm 0,03$	$0,85 \pm 0,01$
ППТ	$0,40 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
ПЭТ	$0,85 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
Резина	$2,50 \pm 0,01$	$1,17 \pm 0,03$	$0,47 \pm 0,01$
OSB-плита	$7,40 \pm 0,01$	$6,24 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,01$

Сравнение полученных результатов с известными данными [14; 15] показало, что они практически идентичны, отличие доли сгоревшего материала для исследованных материалов по сравнению с результатами работ [14; 15] находится в пределах 1–2 %.

Проведенные исследования доли сгоревшего материала $A_{дсм}$ при определении коэффициента дымообразования позволяют сделать следующие выводы:

1. Для ряда синтетических полимерных материалов (ППТ, ППУ и ПЭТ) характерно полное выгорание ($A_{дсм} = 1$) до момента достижения максимального ослабления оптического излучения, проходящего через образованный при их горении дым.

2. Исследуемые образцы ПВХ и резины образовывали негорючий остаток. По всей видимости, это связано с наличием в исследуемых образцах негорючих соединений (например, SiO_2 , CaCl_2 , КОН и др.).

Следует отметить, что на стадии предварительных исследований в качестве ПВХ изделия нами применялась ПВХ-панель [4], а в результатах, представленных в таблице 1, – ПВХ-короб, применяемый для прокладки электрической проводки. При этом в первом случае доля сгоревшего материала $A_{дсм}$ составляла $0,75 \pm 0,03$, а рассматриваемом случае – $0,52 \pm 0,01$. Вместе с тем ослабление интенсивности излучения при горении указанных образцов было сопоставимо. Для ПВХ-панели оно составляло около 83 %, а для ПВХ-короба – около 75 %. Средняя масса сгоревшей ПВХ-панели превышала аналогичный параметр ПВХ-короба примерно на 10 %. Таким образом, для изделий из ПВХ доля массы сгоревшего материала $A_{дсм}$ при достижении максимального ослабления оптического излучения, проходящего через образованный при их горении дым, может варьироваться в достаточно широком диапазоне (50–80 % от начальной массы).

Меньшая доля сгоревшей массы для ПВХ-короба обусловлена его областью применения и внесением в полимерную композицию материала специальных металлсодержащих

⁴ См. сноску 1.

добавок, снижающих его пожарную опасность вследствие уменьшения скорости распространения пламени. Однако, как показали наши исследования, в условиях пламенного горения ослабление интенсивности оптического излучения, а следовательно, и значения коэффициентов дымообразования ПВХ-коробов и изделий, в которых указанные добавки отсутствуют, будут сопоставимы.

3. Древесина и изделия из нее (за исключением фанеры) имеют практически одинаковое значение доли сгоревшего материала $A_{дсм}$, составляющего 0,80–0,85 от начальной массы образцов. Вместе с тем наблюдается увеличение доли сгоревшего материала при уменьшении толщины изделия. Например, для исследованных образцов OSB-панели (толщина – 9,0 мм) значение $A_{дсм}$ составило $0,84 \pm 0,01$, а для образцов древесины (толщина образцов – 5,0 мм) – $0,87 \pm 0,01$. Наиболее выражен данный эффект при горении фанеры (толщина образцов – 4,0 мм, толщина слоев – около 1,3 мм) – $A_{дсм} = 0,94 \pm 0,01$. Особенностью горения этого материала являлось резкое «вскрытие» слоев образца, обусловленное его неоднородностью (наличием более тонких слоев исходного материала). После чего происходит одновременное горение всех слоев фанеры. Полученные значения $A_{дсм}$ для исследованных образцов фанеры ($0,94 \pm 0,01$) практически совпадают со значением $A_{дсм}$ для картона, равным $0,96 \pm 0,03$ согласно работам [14; 15].

Экспериментальные исследования ослабления интенсивности оптического излучения в зависимости от длины волны. Зависимость ослабления интенсивности оптического излучения в дыму от длины волны определяется соответствующей зависимостью удельного массового коэффициента экстинкции σ_s . Как следует из выражений (2), (3):

$$k = \sigma_s(\lambda) \cdot C_d, \quad (4)$$

где C_d – концентрация дыма,

$$C_d = \frac{m_d}{V} = \frac{m_n}{V} A_{дсм} Y_s. \quad (5)$$

Следовательно, при одинаковой величине пожарной нагрузки m_n относительная величина удельного массового коэффициента экстинкции $\sigma_s(\lambda_i)$ будет равна отношению показателей ослабления (экстинкции) излучения k на измеряемой λ_i и базовой λ_0 длинах волн:

$$\frac{\sigma_s(\lambda_i)}{\sigma_s(\lambda_0)} = \frac{k(\lambda_i)}{k(\lambda_0)} = \frac{D_m(\lambda_i)}{D_m(\lambda_0)}. \quad (6)$$

Измерения показателя экстинкции k на различных длинах волн были проведены на экспериментальной установке «Дым». В качестве источников света применялись полупроводниковые лазерные модули (SJ010 ($\lambda = 405 \pm 10$ нм), s-12 ($\lambda = 532 \pm 5$ нм), DSL6505-0921 ($\lambda = 650 \pm 5$ нм), s-13 ($\lambda = 850 \pm 2$ нм), KLM-D980-5-5 ($\lambda = 980 \pm 5$ нм)) мощностью 3–5 мВт. Для каждого исследуемого материала последовательно проводились серии из 5 опытов для каждой длины волны. Погрешность определения величины $\sigma_s(\lambda_i)$ определяется погрешностью измерения $k(\lambda_i)$ и погрешностью приготовления образцов пожарной нагрузки одинаковой массы. Образцы исследуемых материалов готовились с погрешностью по начальной массе не более 0,01 г. Данная точность была определена на стадии предварительных экспериментов и позволяла обеспечить погрешность конечных результатов не более 15 % (т.е. соответствовала требованиям метода ГОСТ⁵). Показатель ослабления k определялся согласно закону Бугера – Ламберта. Результаты полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2.

Графически полученные результаты представлены на рисунке 2. На графиках показаны отношения средних значений показателя ослабления k_{λ} , полученные на длинах волн 405, 532, 850 и 980 нм, к среднему показателю ослабления на длине волны 650 нм – k_{650} . Это обусловлено тем, что для наиболее близкой к длине волны, равной 632,8 нм, известно усредненное значение удельного массового коэффициента экстинкции σ_s (8700 ± 1170 м²/кг) [9]. Таким образом, зная соотношение показателя ослабления на длине волны k_{λ}/k_{650} в исследуемом диапазоне, можно определить соответствующее соотношение значений удельного массового коэффициента экстинкции $\sigma_s(\lambda)/\sigma_s(650)$.

⁵ См. сноску 1.

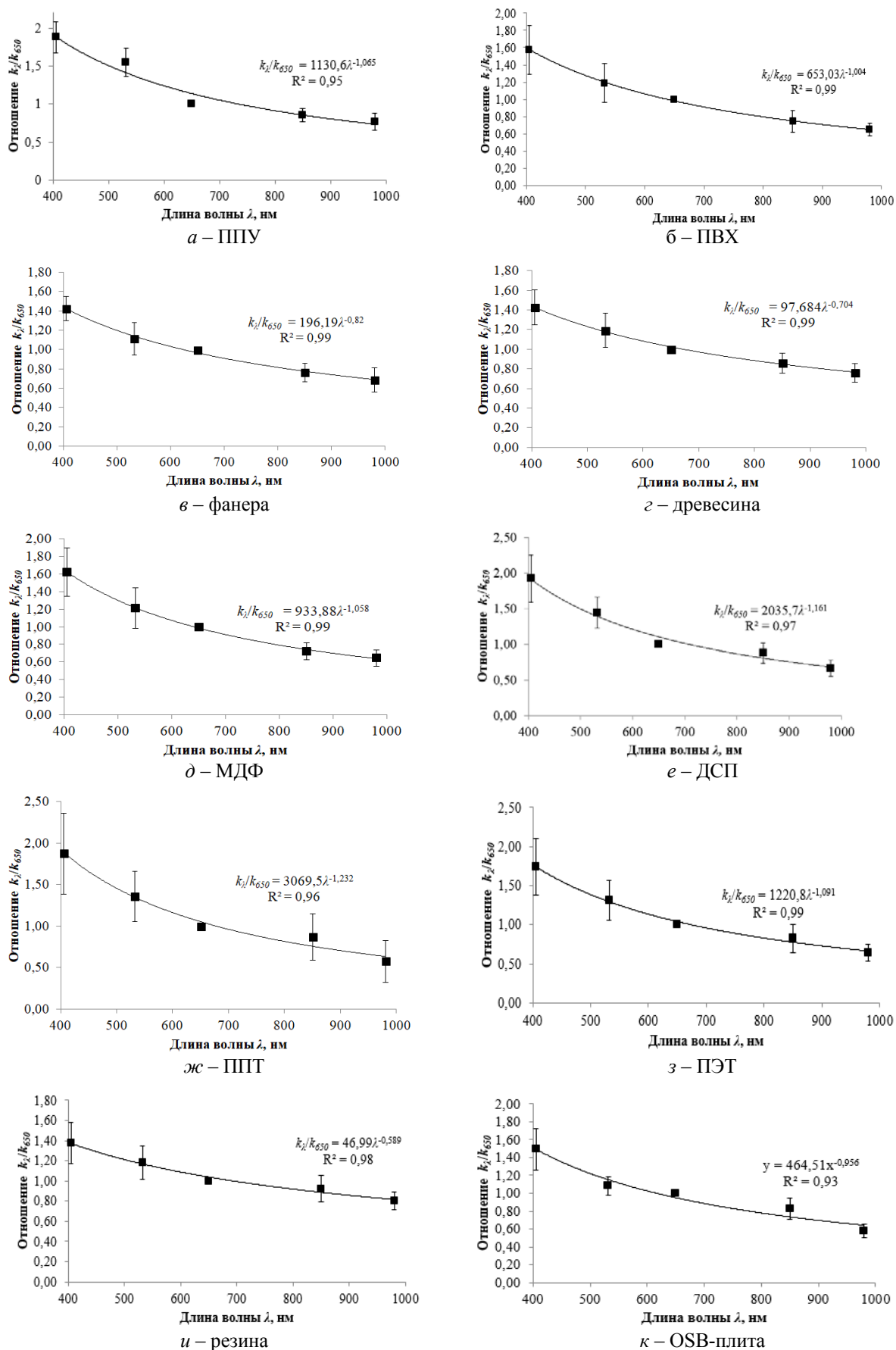


Рисунок 2. – Зависимости отношения показателя ослабления оптического излучения k_l (405, 532, 850 и 980 нм) к показателю ослабления k_{650} для исследованных материалов

Таблица 2. – Значения показателя ослабления оптического излучения k при различных длинах волн зондирующего излучения

Материал	Показатель ослабления оптического излучения k при длине волны зондирующего излучения, м ⁻¹				
	405 нм	532 нм	650 нм	850 нм	980 нм
ППУ	0,34 ± 0,01	0,28 ± 0,03	0,18 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,14 ± 0,02
ПВХ	2,64 ± 0,14	1,98 ± 0,31	1,67 ± 0,18	1,24 ± 0,17	1,08 ± 0,03
Фанера	0,92 ± 0,02	0,72 ± 0,10	0,64 ± 0,04	0,49 ± 0,05	0,44 ± 0,07
Древесина	0,67 ± 0,02	0,56 ± 0,06	0,47 ± 0,08	0,41 ± 0,03	0,36 ± 0,03
МДФ	1,63 ± 0,07	1,22 ± 0,18	1,00 ± 0,12	0,73 ± 0,05	0,65 ± 0,05
ДСП	1,08 ± 0,11	0,81 ± 0,06	0,56 ± 0,08	0,49 ± 0,04	0,37 ± 0,04
ППТ	0,57 ± 0,03	0,41 ± 0,03	0,30 ± 0,06	0,26 ± 0,06	0,17 ± 0,07
ПЭТ	0,66 ± 0,03	0,49 ± 0,06	0,38 ± 0,06	0,31 ± 0,05	0,24 ± 0,02
Резина	2,15 ± 0,08	1,85 ± 0,18	1,57 ± 0,16	1,44 ± 0,15	1,26 ± 0,05
OSB-плита	1,45 ± 0,07	1,05 ± 0,03	0,97 ± 0,08	0,80 ± 0,09	0,56 ± 0,06

Анализ полученных данных показал, что в исследуемом диапазоне длин волн зависимости в целом идентичны для всех исследованных материалов и подчиняются зависимости вида:

$$k_{\lambda}/k_{650} = A_1 \lambda^{-A_2}, \quad (7)$$

где A_1 и A_2 – коэффициенты, определяемые согласно таблице 3.

Таблица 3. – Значения коэффициентов A_1 и A_2 для исследованных материалов

Материал	Коэффициент A_1	Коэффициент A_2
ППУ	1130,6	1,065
ПВХ	653,0	1,004
Фанера	196,2	0,820
Древесина	97,7	0,704
МДФ	933,9	1,058
ДСП	2035,7	1,161
ППТ	3069,5	1,232
ПЭТ	1220,8	1,091
Резина	47,0	0,589
OSB-плита	464,5	0,956

Для проверки справедливости полученных результатов было проведено сравнение их с данными работы [16] (рис. 3).

Экспериментальные данные, приведенные в указанной работе, соответствуют теоретическим расчетным значениям, полученным ее авторами на основании теории Ми для горения сырой нефти. В качестве материала для сравнения была выбрана резина, т.к. средние размеры частиц дыма при ее горении максимально приближены к размерам частиц дыма, образующихся при горении нефти.

Полученные зависимости изменения показателя ослабления k от длины волны оптического излучения, проходящего через задымленную среду при горении различных материалов, позволяют определять значения коэффициента дымообразования D_m с учетом максимальной чувствительности глаза человека (505 нм) в условиях задымления, т.е. сумеречного зрения. Отношение показателя ослабления на длине волны 505 нм k_{505} к показателю ослабления на стандартизированной длине волны 632 нм k_{632}

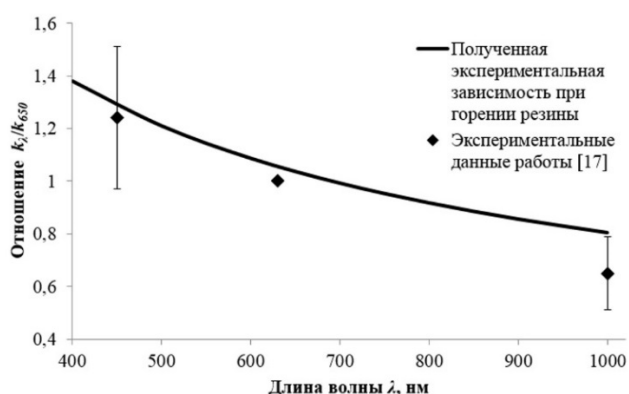


Рисунок 3. – Экспериментальная зависимость показателя ослабления оптического излучения k_i , приведенного к показателю ослабления на длине волны 650 нм k_{650} , при горении резины в сравнении с экспериментальными данными работы [17]

согласно зависимости (7) составляет 1,15–1,30. Представленная в формуле (7) зависимость позволяет прогнозировать изменение показателя ослабления оптического излучения и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s в диапазоне 400–1100 нм.

Анализ полученных экспериментальных данных. Зависимость D_m от длины волны зондирующего излучения λ обусловлена тем, что удельный массовый коэффициент экстинкции является функцией λ . Исходя из полученных значений доли сгоревшей массы исследованных материалов $A_{дсм}$ и зависимостей $\sigma_{s(\lambda)}/\sigma_{s(650)}$ был проведен расчет значений D_m для длины волны, соответствующей максимуму чувствительности глаза человека в условиях задымления.

В таблице 4 приведены значения D_m , полученные по формуле (1) без учета доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ и при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 650$ нм, и значения D_m , рассчитанные с учетом доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ и при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 505$ нм.

Из таблицы 4 видно, что значения D_m , определенные с учетом доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 505$ нм, значительно больше значений D_m , определенных по стандартной методике ГОСТ⁶. Например, отношение указанных значений для ПВХ и резины составляет 2,4 и 2,6 соответственно.

При моделировании динамики задымления в помещениях в условиях пожара заниженная величина D_m приведет к увеличению времени установления критического значения расстояния предельной видимости и, соответственно, к уменьшению реальной вероятности воздействия на человека опасных факторов пожара при его возникновении.

Таблица 4. – Результаты расчетов коэффициента дымообразования D_m

Материал	Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг		
	при начальной массе m и $\lambda = 632$ нм	при сгоревшей массе Δm и $\lambda = 505$ нм	увеличение, раз
ППУ	144	215	1,5
ПВХ	253	611	2,4
Фанера	90	114	1,3
Древесина	68	95	1,4
МДФ	70	113	1,6
ДСП	88	151	1,7
ППТ	386	559	1,5
ПЭТ	227	311	1,4
Резина	321	826	2,6
OSB-плита	67	96	1,4

Для оценки влияния рассматриваемых изменений значений D_m на время критической продолжительности пожара по потере видимости была проведена серия расчетов согласно методике ГОСТ⁷. При постоянных параметрах помещения и пожарной нагрузки варьировалось значение коэффициента дымообразования D_m – проводилось его последовательное увеличение до 2,6 раза от начального значения. Уменьшение расчетного времени наступления потери видимости в условиях пожара при отсутствии учета массы сгоревшего материала Δm и длины волны зондирующего излучения при определении коэффициента дымообразования D_m составляет около 30 %. Таким образом, при отсутствии учета доли сгоревшей массы материала при определении его коэффициента дымообразования и спектральной чувствительности глаза (т.е. длины волны зондирующего излучения при определении коэффициента дымообразования) расчетное время наступления критической видимости при пожаре будет завышено. Данная методическая погрешность может достигать значения до 30 %. Следовательно, условия безопасной эвакуации не могут быть обеспечены.

⁶ См. сноску 1.

⁷ Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; введ. 17.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.

Методика определения удельного выхода дыма. На основании формулы (3) и проведенных исследований по установлению доли сгоревшего материала при определении коэффициента дымообразования D_m может быть определена величина удельного выхода дыма Y_s исходя из значения D_m , определяемого по стандартной методике⁸:

$$Y_s = \frac{D_m}{A_{осм} \sigma_s}. \quad (8)$$

Проведенные исследования, представленные в данной работе, а также результаты работы [7] позволили сформулировать методику определения величины удельного выхода дыма Y_s на основании результатов экспериментов по определению коэффициента дымообразования D_m с учетом доли сгоревшего материала $A_{осм}$ при достижении максимума ослабления оптического излучения и значения удельного массового коэффициента экстинкции σ_s для различных видов материалов.

Методика определения величины удельного выхода дыма Y_s включает следующие операции:

1. Определить ослабление оптического излучения, проходящего через образованный при пламенном горении материала дым, и долю сгоревшего материала $A_{осм}$ в условиях стандартных испытаний при расчете коэффициента дымообразования D_m согласно методике ГОСТ⁹.

2. Определить согласно справочным данным или расчетным способом значение удельного массового коэффициента экстинкции σ_s для заданного материала. В случае отсутствия данных по σ_s принять его равным 8700 м²/кг (при $\lambda = 632$ нм).

3. Произвести расчет удельного выхода дыма Y_s согласно формуле (8).

Для проверки корректности разработанной методики было проведено сравнение полученных результатов Y_s с данными работы [17], в которой наиболее полным образом представлены значения Y_s , полученные зарубежными исследователями. Расчетные значения Y_s представлены с учетом результатов работы [8] по определению значений σ_s для конкретных материалов. Результаты приведены в таблице 5. В таблице для сравнения приведены результаты расчетов Y_s , выполненных по общепринятому выражению (3) (т.е. D_m определен для начальной массы образцов и $\sigma_s = 8700$ м²/кг).

Таблица 5. – Значения удельного выхода согласно разработанной методике в сравнении с общепринятой методикой его определения и данными из литературных источников

Материал	Удельный выход дыма Y_s , рассчитанный по общепринятому выражению (3)	Расчет по разработанной методике			Удельный выход дыма Y_s согласно источнику [18]
		Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг	Удельный массовый показатель экстинкции σ_s , м ² /кг [8]	Удельный выход дыма Y_s	
ППУ	0,017	144	8100	0,018	0,131–0,227
ПВХ	0,029	484	9500	0,051	0,076–0,098
Фанера	0,010	96	8100	0,012	0,015
Древесина	0,008	78	8100	0,010	0,015
МДФ	0,008	87	8100	0,011	0,015
ДСП	0,010	103	8100	0,013	0,015
ППТ	0,044	386	9800	0,039	0,164
ПЭТ	0,026	227	8800	0,026	0,056–0,102
Резина	0,037	685	10300	0,067	0,078
OSB-плита	0,008	80	8100	0,010	0,015

Проведенное сравнение свидетельствует о хорошем совпадении полученных результатов с имеющимися данными в литературных источниках. Отличие данных по Y_s , полученных по разработанной методике, от известных значений Y_s составляют 13–33 %. При этом значения Y_s , рассчитанные по общепринятому выражению (3), отличаются от известных значений Y_s [17] на 35–63 %. Некоторое отличие полученных нами экспериментальных данных

⁸ См. сноску 1.

⁹ См. сноску 1.

от приведенных в работе [17] по ряду синтетических полимеров (полиэтилен, пенополиуретан и полистирол) может объясняться наличием различных добавок в исходных материалах для придания им определенных свойств.

Дополнительная верификация представленной методики определения Y_s и σ_s осуществлена посредством полевой модели развития пожара. В программном комплексе FDS [1] была разработана модель стандартизированной по ГОСТ¹⁰ установки по определению коэффициента дымообразования D_m (рис. 4). Далее было проведено моделирование выполненных экспериментальных исследований для полученных согласно выражению (3) и разработанной методике значений Y_s .

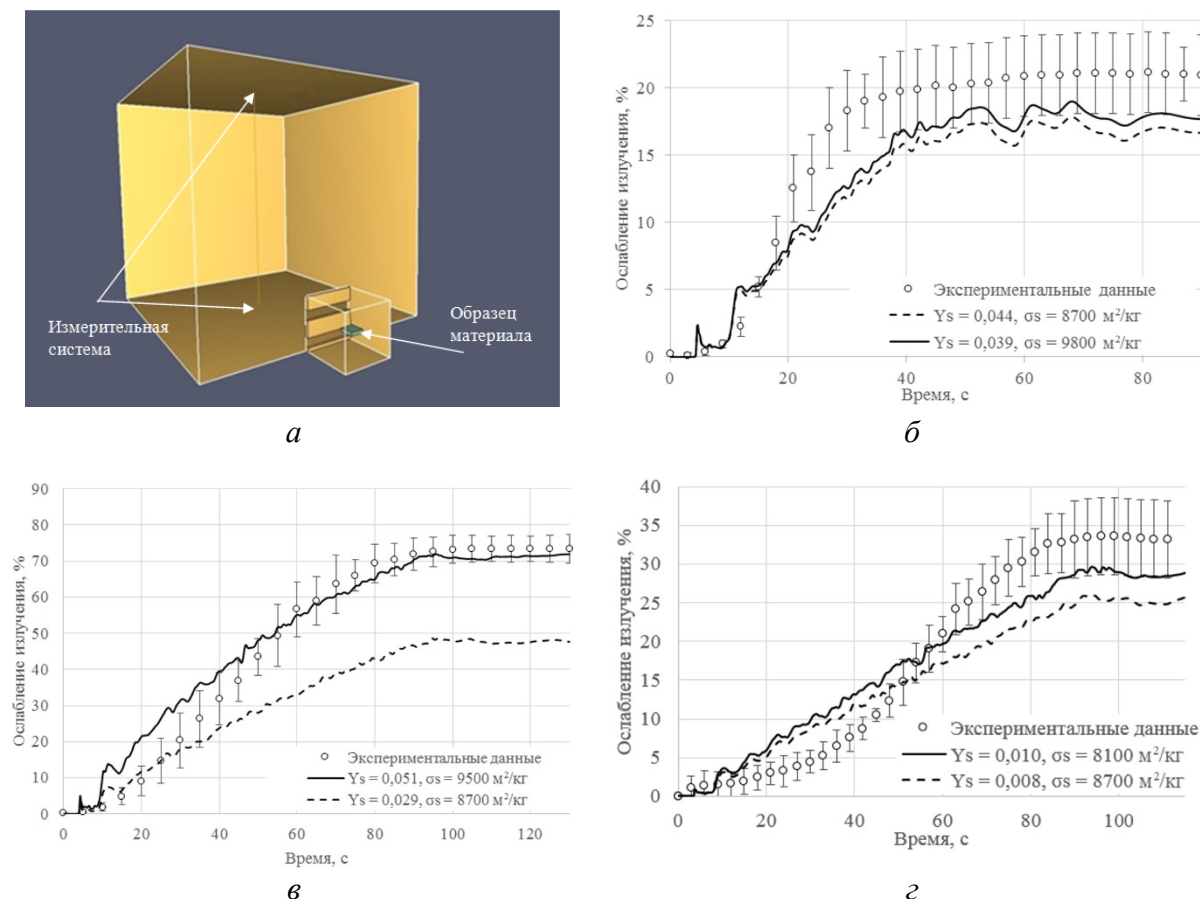


Рисунок 4. – Модель установки по определению коэффициента дымообразования (а) и результаты моделирования ослабления проходящего через дым оптического излучения в сравнении с экспериментальными данными для материалов: ППТ (б), ПВХ (в), древесина (г)

В качестве материалов для моделирования были приняты ППТ и ПВХ как образцы синтетических полимеров, у которых максимально отличается доля сгорания материала $A_{осм}$ при определении их коэффициента дымообразования D_m , а в качестве целлюлозосодержащих материалов была принята древесина. Значения исходных параметров моделирования приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Входные данные для моделирования

Параметр	Значение параметров					
	Древесина		ПВХ		ППТ	
Материал	Древесина		ПВХ		ППТ	
Плотность, кг/м ³	450		1250		20	
Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	1,6		0,9		1,7	
Удельная теплопроводность, Вт/м·К	0,14		0,20		0,04	
Удельная массовая скорость выгорания, кг/м ² ·с	0,015		0,024		0,012	
Удельный массовый коэффициент экстинкции, м ² /кг	8700	8100	8700	9500	8700	9800
Удельный выход дыма	0,008	0,010	0,029	0,051	0,044	0,039

¹⁰ См. сноску 1.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования и экспериментальные данные по определению ослабления оптического излучения при его прохождении через дым.

Сравнение данных, полученных при моделировании, с экспериментальными значениями показывает, что лучшее совпадение имеют результаты расчета при Y_s , определенном по разработанной методике. Отклонение значений ослабления излучения при моделировании для указанных значений Y_s от экспериментальных данных составляет 2–12 %. При этом отклонение значений при Y_s , определенных по общепринятому выражению (3), находится в диапазоне 14–36 %. Таким образом, разработанная методика позволяет повысить точность определения ослабления оптического излучения в 2–3 раза по сравнению с общепринятым подходом.

Заключение

1. Экспериментально определены значения коэффициента $A_{дсм}$, описывающего долю массы сгоревшего материала в экспериментах по определению коэффициента дымообразования D_m . Отличие доли сгоревшего материала для исследованных материалов по сравнению с данными, приведенными в литературных источниках, находится в пределах 1–2 %. Для ряда синтетических полимерных материалов (пенополистирол, пенополиуретан, полиэтилен) характерно полное выгорание при определении их коэффициентов дымообразования. Значение $A_{дсм}$ для синтетических полимеров, склонных при горении к образованию коксового остатка, составляет 0,50–0,75. Природные полимерные и композиционные (на основе древесины) материалы имеют значения $A_{дсм}$ равные 0,80–0,85. При этом с уменьшением толщины материала наблюдается увеличение значения $A_{дсм}$. Для слоистых материалов (например, фанеры с толщиной слоя около 1,3 мм) $A_{дсм}$ составляет 0,95.

2. Получены экспериментальные зависимости изменения показателя ослабления оптического излучения k , проходящего через задымленную среду при горении 10 различных материалов от длины волны излучения, позволяющие определять коэффициент дымообразования D_m с учетом максимальной чувствительности глаза человека в условиях задымления. Отношение показателя ослабления на длине волны 505 нм k_{505} к показателю ослабления на стандартизированной длине волны 632 нм k_{632} согласно зависимости (4) составляет 1,15–1,30.

3. Показано, что при отсутствии учета $A_{дсм}$ и длины волны зондирующего излучения значение коэффициента дымообразования D_m уменьшается до 2,6 раза, что приводит к увеличению расчетного значения времени наступления потери видимости при пожаре до 30 %.

4. Разработана методика определения удельного выхода дыма Y_s на основании результатов экспериментов по определению коэффициента дымообразования D_m , учитывающая долю сгоревшего материала $A_{дсм}$ при достижении максимума ослабления оптического излучения и зависимость удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от вида материалов.

5. Экспериментально определены значения удельного выхода дыма для древесины хвойных пород, древесностружечной плиты, древесно-волокнуистой плиты средней плотности, фанеры, ориентированно-стружечной плиты, пенополистирола, поливинилхлорида, полиэтилена, пенополиуретана и резины. Проведенное сравнение полученных согласно разработанной методике значений Y_s с имеющимися данными в литературных источниках свидетельствует о хорошем совпадении полученных результатов (отличие полученных данных составляет 13–33 %).

6. Для верификации разработанной методики определения удельного выхода дыма в полевой модели развития пожара в программном комплексе FDS разработана модель стандартизированной установки по определению коэффициента дымообразования. Проведено моделирование экспериментальных исследований по определению ослабления оптического излучения при его прохождении через дым. Установлено, что разработанная методика позволяет повысить точность определения Y_s в 2–3 раза по сравнению с методикой, основанной на ГОСТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fire dynamics simulator (Version 5). User's Guide [Electronic resource] / K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd. – Washington: U.S. NIST, 2007. – Mode of access: http://fire.fsv.cvut.cz/ifer/2014-Training_school/Materials%20to%20software%20courses/FDS/FDS_5_User_Guide.pdf – Date of access: 16.02.2014.
2. Mulholland, G.W. The Effect of Scale on Smoke Emission / G.W. Mulholland, V. Henzel, V. Babrauskas // Fire Safety Science: Proceedings of the Second International Symposium, Tokyo, June 13–17,

1988. / Science University of Tokyo; ed.: T. Wakamatsu [et al.]. – New York: Hemisphere Publishing Corp., 1989. – Pp. 347–357.
3. Mulholland, G.W. Generation and Transport of Smoke Components / K.M. Butler, G.W. Mulholland // Fire Technology. – 2004. – Vol. 40. – P. 149–176. DOI: 10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64.
 4. Суриков, А.В. Определение значений параметров моделирования и интерпретация выходных данных в программном комплексе FDS при расчете видимости в условиях задымления / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 308–319. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.308.
 5. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
 6. Mulholland, G.W. Smoke Production and Properties / G.W. Mulholland // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno [et al.]. – 4th ed. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. – Chapter 13. – Pp. 2-291 – 2-302.
 7. Суриков, А.В. Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 147–160. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.147.
 8. Mulholland, G.W. Specific extinction coefficient of flame generated smoke / G.W. Mulholland, C. Croarkin // Fire and Materials. – 2000. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 227-230. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-9.
 9. Mulholland, G.W. Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter / G.W. Mulholland, E.L. Johnsson, M.G. Fernandez, D.A. Shear // Fire and Materials. – 2000. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 231–243. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-N.
 10. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim [Электронный ресурс] // PyroSim. – Режим доступа: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf – Дата доступа: 30.11.2017.
 11. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода необходимого времени эвакуации людей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.С. Зотов. – М., 1989. – 273 л.
 12. Тарасов, В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа: монография / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушников. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
 13. Суриков, А.В. Количественная оценка ослабления оптического излучения, проходящего через задымленную среду / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк, В.О. Петухов // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 14–18.
 14. Трушкин, Д.В. Совершенствование методологии определения пожарной опасности строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Д.В. Трушкин. – М., 2004. – 226 л.
 15. Кочкин, А.Ю. Прогнозирование и контроль экологической опасности дымов: дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / А.Ю. Кочкин. – Братск, 2006. – 160 л.
 16. Dobbins, R.A. Comparison of fractal smoke optics model with light extinction measurement / R.A. Dobbins, G.W. Mulholland, N.P. Bryner // Atmospheric Environment. – 1994. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 889–897. DOI: 10.1016/1352-2310(94)90247-X.
 17. Tewarson, A. Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fire / A. Tewarson // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno [et al.]. – 4th ed. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. – Chapter 3. – Pp. 3-109 – 3-195.

**Определение характеристик дымообразующей способности строительных материалов
и расчет видимости при пожаре**

**Determination of building materials's smoke generating characteristics
and calculating the visibility in a fire**

Суриков Андрей Валерьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра организации
службы, надзора и правового обеспечения

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Andrey V. Surikov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Organization of Service, Supervision
and Law Support, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Лешенюк Николай Степанович

доктор физико-математических наук,
профессор

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
естественных наук, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Nikolay S. Leshenyuk

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.5>

DETERMINATION OF BUILDING MATERIALS'S SMOKE GENERATING CHARACTERISTICS AND CALCULATING THE VISIBILITY IN A FIRE

Surikov A.V., Leshenyuk N.S.

Purpose. For various types of materials, to study the dependence of the value of the smoke production coefficient, determined according to a standardized method, on the fraction of burnt material and the wavelength of optical radiation passing through smoke-filled environment during their combustion; based on the data obtained to develop corrected methods for determining the values of the smoke production coefficient and smoke yield.

Methods. The values of the attenuation coefficient and the fraction of burnt material in determining its smoke production coefficient were determined experimentally. The change of the time of visibility loss at a fire was determined by a calculation method.

Findings. The values of the attenuation coefficient of optical radiation passing through a smoke-filled environment during the combustion of 10 types of materials were experimentally obtained and the values of the smoke production coefficient were determined, taking into account the fraction of the mass of the burnt material and the radiation wavelength. An experimental dependence of the change in the attenuation index of optical radiation in the wavelength range (400–1100) nm during the combustion of 10 types of materials has been established. The values of smoke yield of 10 types of materials have been determined experimentally. It is shown that without taking into account the fraction of the mass of the burnt material and the wavelength of the probing radiation, the value of the smoke production coefficient decreases by 2.6 times, which leads to an increase in the calculated value of estimated time of onset of visibility loss at a fire up to 30 %. The method for determining the smoke yield during materials combustion has been corrected.

Application field of research. The results can be applied in modeling fires and fire risk assessment.

Keywords: modeling, visibility, smoke-generating ability, smoke yield, attenuation coefficient of optical radiation, radiation wavelength, fraction of burnt material mass.

(The date of submitting: January 11, 2021)

REFERENCES

1. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. Fire dynamics simulator (Version 5). User's Guide, available at: http://fire.fsv.cvut.cz/ifer/2014-Training_school/Materials%20to%20software%20courses/FDS/FDS_5_User_Guide.pdf (accessed: February 16, 2014).
2. Mulholland G.W., Hanzel V., Babrauskas V. The Effect of Scale on Smoke Emission. *Proc. of the Second International Symposium «Fire Safety Science», Tokyo, June 13–17, 1988.* Science University of Tokyo. Ed. by: T. Wakamatsu et al. New York, 1989. Pp. 347–357.
3. Mulholland G.W., Butler K.M. Generation and Transport of Smoke Components. *Fire Technology*, 2004. Vol. 40. Pp. 149–176. DOI: 10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64.
4. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Opredelenie znacheniy parametrov modelirovaniya i interpretatsiya vyhodnyh dannyh v programmnom komplekse FDS pri raschete vidimosti v usloviyah zadymleniya [Determination of simulation parameters values and output data interpretation in fds during calculating visibility in smoke conditions]. *Journal of Civil Protection*. 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 308-319. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.308.
5. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Forecasting of indoor fire hazards]: tutorial. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2000. 118 p. (rus)
6. Mulholland G. Smoke Production and Properties. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. By ed. P.J. DiNenno et al. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. Chapter 13. Pp. 2-291 – 2-302.
7. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Raschet vidimosti v pomeshcheniyakh v usloviyakh pozhara s primeneniem programmnoho kompleksa FDS [Modeling of visibility in a room under fire conditions with

- application of the FDS software complex]. *Journal of Civil Protection*. 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 147-160. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.147.
8. Mulholland G.W. Specific extinction coefficient of flame generated smoke. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24, No. 5. Pp. 227–230. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-9.
 9. Mulholland G.W. Johnsson E.L., Fernandez M.G., Shear D.A. Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24, No. 5. Pp. 231–243. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-N.
 10. Rabota v programmnom komplekse FireCat. Biblioteka reaktsiy i poverkhnostey goreniya v PyroSim [Work in the FireCat software package. Library of reactions and combustion surfaces in PyroSim], available at: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf (accessed: November 30, 2017). (rus)
 11. Zotov Yu.S. *Protsess zadymleniya pomeshcheniy pri pozhare i razrabotka metoda rascheta neobkhodimogo vremeni evakuatsii lyudey* [The process of smoke pollution in the premises during a fire and the development of a method for the required time of evacuation of people]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.01. Moscow, 1989. 273 p. (rus)
 12. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashego tipa* [Infrared systems of seeing type]: monograph. Moscow: Logos, 2004. 444 p. (rus)
 13. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Petukhov V.O. Kolichestvennyye kharakteristiki opticheskogo izlucheniya, prokhodyashchego cherez zadymlennuyu sredu [Quantitative characteristics of optical radiation passing through the environment]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2011. No. 2 (14). Pp. 14–18. (rus)
 14. Trushkin D.V. *Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya pozharnoy opasnosti stroitel'nykh materialov* [Improvement of the methodology for determining the fire hazard of building materials]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2004. 226 p. (rus)
 15. Kochkin A.Yu. *Prognozirovaniye i kontrol' ekologicheskoy opasnosti dymov* [Prediction and control of environmental hazard of fumes]: PhD tech. sci. diss.: 03.00.16. Bratsk, 2006. 160 p. (rus)
 16. Dobbins R.A., Mulholland G.W., Bryner N.P. Comparison of fractal smoke optics model with light extinction measurement. *Atmospheric Environment*. 1994. Vol. 28, No. 5. Pp. 889–897. DOI: 10.1016/1352-2310(94)90247-X.
 17. Tewarson A. Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fire. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. By ed. P.J. DiNenno et al. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. Chapter 13. Pp. 3-109 – 3-195.