

УДК 614.841

**РАСЧЕТ ВИДИМОСТИ В ПОМЕЩЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FDS****Суриков А.В., Лешенюк Н.С.**

Проведено моделирование процесса ухудшения видимости в условиях пожара в рамках программы FDS (Fire Dynamics Simulator). Полученные результаты сравниваются с результатами натурных исследований. Проведенное моделирование показало, что при расчете времени потери видимости в помещении при задымлении, результат зависит от удельного массового показателя экстинкции σ_s . Лучшую сходимость с экспериментальными данными имеют значения удельного выхода дыма Y_s , определенные индивидуально для конкретной пожарной нагрузки. Представлены и обоснованы предложения по совершенствованию методики преобразования данных по коэффициентам дымообразования материалов в значения удельного выхода дыма.

Ключевые слова: прогнозирование, видимость, дымообразующая способность, удельный выход дыма, экспериментальные исследования.

(Поступила в редакцию 7 февраля 2018 г.)

Введение. При расчете ухудшения видимости в условиях задымления в отечественной практике одним из определяющих параметров является коэффициент дымообразования D_m – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или термоокислительной деструкции (тлении) определенного количества твердого вещества (материала) в условиях специальных испытаний согласно методике [1]. В зарубежной практике для количественной характеристики дымообразования применяется удельный выход дыма Y_s (soot yield), который определяется как доля горючего материала, идущего на образование дыма [2, с. 150], т. е. отношение массы дыма m_d , образованного при сгорании горючего материала, к массе сгоревшего материала m_m . Именно Y_s широко используется в различных вычислительных программах для расчета опасных факторов пожара [2].

В работе [3] определена возможность перевода коэффициента дымообразования D_m в удельный выход дыма Y_s аналитическим методом: удельный выход дыма Y_s равен отношению коэффициента дымообразования D_m к удельному массовому показателю экстинкции σ_s . В работе [4] была проведена проверка соответствия указанной зависимости экспериментальным данным D_m . В результате моделирования процесса определения коэффициента дымообразования согласно [1] в программе FDS (Fire Dynamics Simulator), реализующей полевую модель развития пожара, показано, что значения удельного выхода дыма Y_s могут быть определены аналитически.

Значение удельного массового показателя экстинкции σ_s в практике моделирования при пламенном горении считается равным $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ вне зависимости от горючего материала [2, 3]. Однако, например, в работе [5] авторами приводятся значения σ_s , варьирующиеся от $5300 \text{ м}^2/\text{кг}$ (ацетилен) до $11200 \text{ м}^2/\text{кг}$ (бензин).

Целью данной работы было сравнение результатов измерений предельной видимости в условиях задымления, полученных в ходе экспериментов [6], с результатами моделирования в программе FDS и влияние выбора значения удельного массового показателя экстинкции σ_s на результаты расчета оптической плотности дымов и времени наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости.

Прогнозирование видимости при задымлении. Численным критерием видимости в условиях непрозрачной атмосферы служит соотношение яркости объекта [7] и яркостного порога человека $V_{кр}$.

Однако в условиях пожара ориентиры рассматриваются на фоне задымленной среды, которая в случае значительного рассеивания света также является светящейся и, если ее яркость достаточно близка к яркости наблюдаемого объекта, последний становится неразпознаваемым. Большинство предметов в реальных помещениях являются несамосветящимися и имеют диффузно отражающую поверхность. Согласно [8, 9] в момент потери видимости такого предмета, т.е. на расстоянии предельной видимости, по закону Бугера-Ламберта яркостный порог зрения человека $V_{кр}$ в условиях задымления связан с предельной видимостью $I_{кр}$ и освещенностью поверхности E_0 следующим соотношением:

$$B_{кр} = \frac{\alpha E_0}{\pi} e^{-kl_{пр}}, \quad (1)$$

где $B_{кр}$ – яркостный порог зрения человека в условиях задымления [8, с. 166], кд/м²; α – коэффициент отражения поверхности объекта; E_0 – освещенность поверхностей, люкс; k – коэффициент ослабления оптического излучения, м⁻¹; $l_{пр}$ – расстояние до объекта (предельная видимость в дыму), м.

В работе [8] в качестве яркостного порога зрения человека в условиях задымления $B_{кр}$ определено значение 0,302 кд/м². Значение получено в результате проведенных экспериментальных исследований по 100 наблюдениям ориентиров, размещенных в помещении, при наличии в поле зрения наблюдателей «темных», характеризующихся в большей степени поглощением оптического излучения, и «светлых» дымов, при прохождении оптического излучения через которые преобладает его рассеивание. Освещенность поверхностей E_0 несамосветящихся ориентиров при расчете времени эвакуации определяется по нормативным документам, а в нерегламентированных случаях принимается равным 50 лк. Коэффициент отражения поверхности объекта α определяется по справочной литературе исходя из внутренней отделки помещений, а при отсутствии данных принимается равным 0,3 [8, с. 272].

С учетом изложенного, предельная видимость в дыму определяется по формуле

$$l_{пр} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\alpha E_0}{\pi B_{кр}} \right) = \frac{1}{k} \ln(1,05 \alpha E_0). \quad (2)$$

Данное соотношение является основой методики расчета предельной видимости в помещении в условиях пожара по ГОСТ 12.1.004:

$$l_{пр} \cong \frac{2,38}{\mu}, \quad (3)$$

где μ – оптическая плотность дыма, Нп·м⁻¹.

В данной формуле коэффициент ослабления оптического излучения k представлен в виде оптической плотности дыма μ – показателя, широко применяемого в нормативных документах и литературе пожарно-технического профиля. Здесь и далее используется коэффициент «Непер» (Нп) – натуральный логарифм отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную.

Подход, предлагаемый зарубежными специалистами при определении значений предельной видимости в задымленных помещениях, в целом аналогичен отечественной практике. В частности, в работах [9, 10] предельная видимость определяется по формуле

$$l_{пр} = C/k, \quad (4)$$

где C – безразмерная характеристика типа объекта, рассматриваемого в дыму ($C = 5 \div 10$ для объекта, излучающего свет; $C = 2 \div 4$ для светоотражающего объекта); k – коэффициент ослабления оптического излучения, м⁻¹.

Коэффициент ослабления оптического излучения может быть выражен из закона Бугера–Ламберта:

$$k = (1/L) \ln(I_0/I), \quad (5)$$

где I – интенсивность прошедшего света; I_0 – интенсивность падающего света; L – длина пути прохождения света через дым, м.

При этом коэффициент ослабления прямо пропорционален произведению удельного массового показателя экстинкции σ_s и массовой концентрации дыма C_m [11]:

$$k = \sigma_s \cdot C_m, \quad (6)$$

где σ_s – удельный массовый показатель (коэффициент) экстинкции, м²/г; C_m – массовая концентрация дыма, кг/м³.

Данные соотношения используются для определения предельной видимости в программе FDS (Fire Dynamics Simulator), реализующей вычислительную гидродинамическую модель (CFD-computation fluid dynamics) тепломассопереноса при горении.

Удельный массовый показатель экстинкции σ_s зависит от дисперсности дыма и длины волны проходящего излучения и согласно [10] определяется по формуле

$$\sigma_s = \frac{3}{2\rho \cdot C_m} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{1}{d} \frac{\Delta C_m}{\Delta d} Q_{ext} \left(\frac{d}{\lambda}, n_r \right) \delta d, \quad (7)$$

где C_m – массовая концентрация дыма, мг/м³; $\Delta C_m/\Delta d$ – функция массового распределения частиц дыма, мг/(мкм·м³); Q_{ext} – коэффициент затухания на одиночной частице; d/λ – отношение диаметра частиц к длине волны света, проходящего через дым; n_r – комплексный показатель преломления частиц дыма; ρ – плотность частиц, кг/м³.

В работе [12] рекомендовано для практических расчетов принимать σ_s равным 8700 м²/кг на длине волны 632,8 нм с доверительным интервалом ± 1170 м²/кг и доверительной вероятностью 95 %. Вывод сделан на основе исследования как мало-, так и крупномасштабных пожаров при горении древесины и пластиков [10]. Именно такое значение данного параметра применяется в практике моделирования развития пожаров в полевой модели [2, 3]. В работе [5] авторами систематизируются результаты исследований σ_s в 5 лабораториях, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Эмпирические значения удельного массового показателя экстинкции

Материал (вещество)	Значения удельного массового показателя экстинкции, м ² /г					Среднее значение, м ² /г
	Factory Mutual	NIST Large Scale Fire Research Laboratory	Georgia Tech Combustion Characterization Facility	University of Essex Institute for Environmental Science	University of Michigan Buoyant Turbulent Flame Facility	
Гептан	10,3	7,8			6,4	8,2
Керосин	10,1		9,2			9,7
Поливинилхлорид	9,9		9,0			9,5
Поликарбонат	10,2		7,6			8,9
Полистирол	10,0		9,6			9,8
Резина	10,4		10,1			10,3
Древесина		8,5	7,6			8,1
Полиуретан		8,1				8,1
Нефть		8,8				8,8
Полиэтилен			8,8			8,8
Полипропилен			7,4			7,4
Бензин				11,2	7,8	9,5
Дизельное топливо				10,3		10,3

Массовая концентрация дыма определяется из выражения

$$C_m = m_d / V, \quad (8)$$

где m_d – масса дыма, кг; V – объем, заполненный дымом, м³.

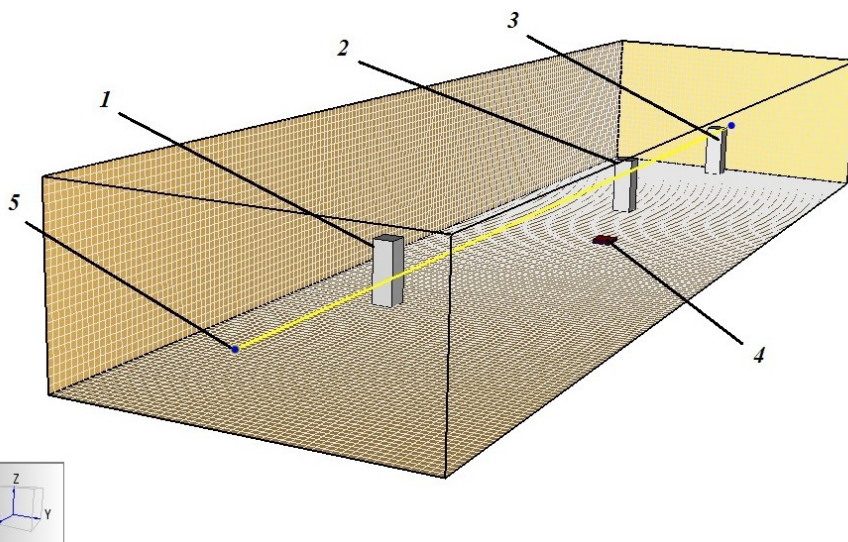
При моделировании изменения видимости при задымлении в помещениях в программе FDS версии 5.0 при описании реакции горения пользователем вводятся как значение безразмерной постоянной характеристики типа объекта C , так и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s . Самым значительным изменением в FDS версии 6.0 является то, что удельный массовый коэффициент экстинкции σ_s задается по умолчанию 8700 м²/кг. Для возможности изменения данного показателя необходимо во входном файле указать пользовательские настройки: `&SPEC ID='SOOT', MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT=..., LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. / [2, с. 235].`

В работе [8] автор обосновывает возможность непосредственного использования имеющегося банка данных коэффициентов дымообразования различных материалов, полученных в условиях испытаний по стандартизированной методике [1], для расчетов динамики задымления помещений. Согласно [3, 4] коэффициент дымообразования D_m связан с удельным выходом дыма Y_s соотношением

$$D_m = Y_s \cdot \sigma_s, \quad (9)$$

Методика моделирования видимости в условиях задымления. Для сравнения результатов натуральных измерений видимости в условиях задымления, определения корректности выбора параметров моделирования в программе FDS проведено моделирование исследований, приведенных в работе [6].

На рисунке 1 показана модель помещения, где производилось исследование оптико-электронной системы улучшения видимости в дыму [6], выполненная в программе PyroSim, которая является графическим интерфейсом программы FDS.



1 – ориентир на расстоянии 8 м; 2 – ориентир на расстоянии 20 м; 3 – ориентир на расстоянии 27 м;
4 – очаг горения; 5 – лучевой оптический датчик (Beam Detector Device)
и датчик газовой среды (Gas-phase Device Visibility)

Рисунок 1. – Модель помещения по исследованию видимости в дыму

Модель представляет собой помещение размером 28,0×8,0×4,0 м с размещаемым в нем образцом горючего материала на расстоянии 16,0 м от точки наблюдения, ориентиров высотой 1,5 м, размещенных на расстоянии 8,0, 20,0 и 27,0 м от точки наблюдения, а также модельных измерительных систем, представляющих собой оптическую систему (Beam Detector Device), которая рассчитывает поглощение оптического излучения, и датчик контроля газовой среды (Gas-phase Device Visibility), определяющий видимость в точке наблюдения. Модельные датчики размещены на высоте 1,5 м. Для анализа распределения полей предельной видимости и направления движения воздушных потоков в помещении были предусмотрены вертикальная плоскость вдоль оси наблюдения и плоскость в горизонтальном сечении на высоте 1,5 м (slice Visibility), а также фиксация векторов скорости воздушных потоков (U-velocity). В качестве горючего материала применялась резина.

Очаг горения смоделирован в виде препятствия OBSTRUCTION с размерами, соответствующими массе материала, при реализации эксперимента с учетом его плотности. При проведении моделирования задавались описание химической формулы горючего материала, низшая теплота сгорания, плотность материала, его удельная теплоемкость и теплопроводность, удельная массовая скорость выгорания, линейная скорость распространения пламени [3], величина удельного выхода дыма для двух значений удельного массового показателя экстинкции [3, 5] (8700 м²/кг и 10300 м²/кг), полученные согласно соотношению (9) при $D_m = 850 \text{ м}^2/\text{кг}$ [3]. Дополнительно в генеральных свойствах задавались условия испытаний (температура и влажность воздуха) согласно [6]. Параметр постоянной характеристики типа объекта C (см. формулу 4) определялся согласно формуле (2) с учетом значений освещенности, полученной при проведении эксперимента [6] и равной 30 люкс. Коэффициент отражения поверхности объекта α принят равным 0,3. Значения параметров моделирования приведены в таблице 2.

Для определения размеров ячеек расчетной сетки был использован онлайн-калькулятор [13]. При этом задавалась скорость тепловыделения как произведение низшей теплоты сгорания и удельной массовой скорости выгорания [3] для размера расчетной сетки, соответствующей размеру моделируемого помещения. Размер ячеек составил – 0,156×0,167×0,167 м, количество элементов – 207 360.

Таблица 2. – Входные данные для моделирования

Параметр материала	Значение параметра
Химическая формула вещества	$C_{0,9}H_{34,4}O_{2,6}$
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	36
Плотность, кг/м ³	1200
Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	0,14
Удельная теплопроводность, Вт/м·К	0,23
Линейная скорость распространения пламени, м/с	0,0184
Удельная массовая скорость выгорания, кг/м ² с	0,0112
Удельный массовый показатель экстинкции, м ² /кг	8700 10300
Удельный выход дыма, кг/кг	0,097 0,082
Параметр условий испытаний	Значение параметра
Температура воздуха, °С	15
Относительная влажность, %	86
Параметр постоянной характеристики типа объекта <i>C</i>	2,25

Значение ослабления оптического излучения, проходящего через задымленную среду, определялось по расчетным значениям оптической системы (Beam Detector Device) на момент времени, соответствующий значению предельной видимости в контрольных точках (27,0 м и 8,0 м), полученных по данным датчика видимости. Контрольные точки соответствовали значениям, полученным в ходе эксперимента [6].

Далее по формуле (5) рассчитывалось значение коэффициента ослабления $K_{осл(мод)}$.

Следующим шагом было сравнение экспериментальных данных коэффициента ослабления $K_{осл(эсп.)}$ [6] и коэффициента ослабления $K_{осл(мод)}$, полученного в результате моделирования.

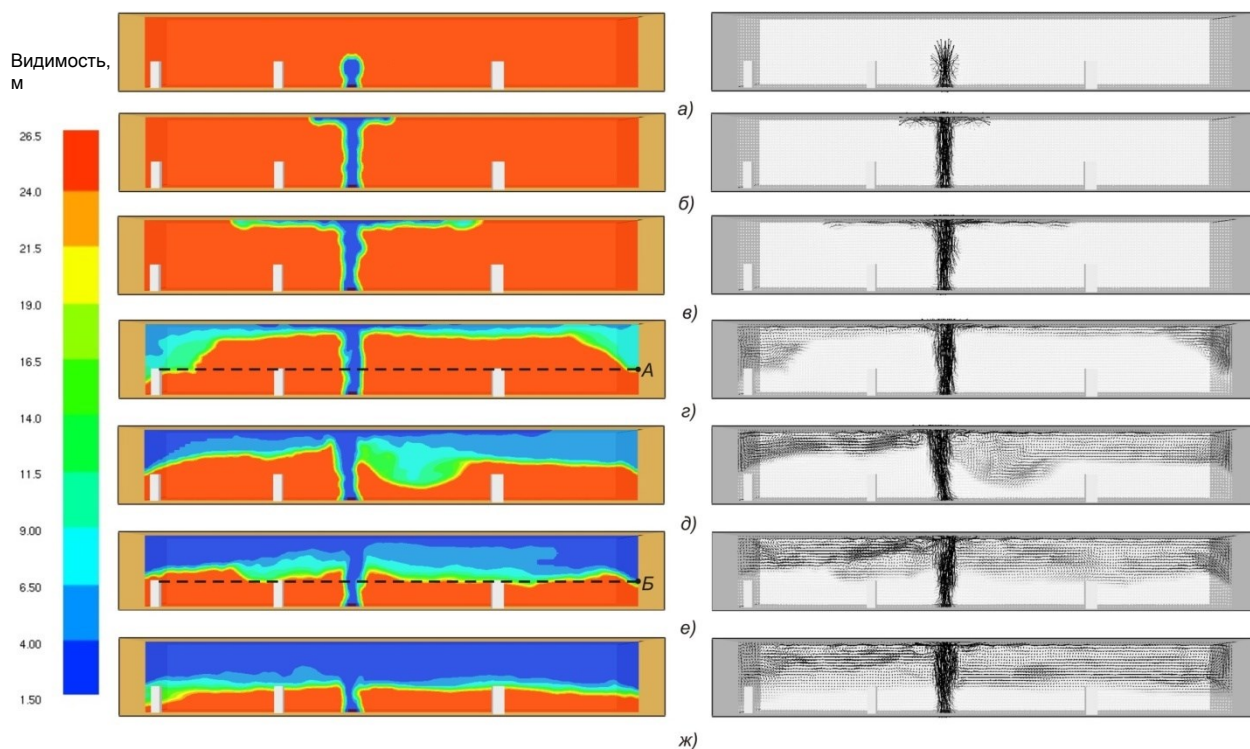
Дополнительно была проведена оценка времени наступления потери видимости при задымлении для различных значений удельного массового показателя экстинкции с целью проверки его влияния на значение времени наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости (на расстоянии 20 м согласно [14]).

Результаты моделирования видимости в условиях задымления. Для анализа распространения дыма в помещении рассмотрим плоскость изменения значения видимости (slice Visibility), изменение которой, как было отмечено ранее, пропорционально изменению концентрации дыма (рис. 2, изображения слева) и распределение в этой плоскости векторов скорости движения воздушных потоков (рис. 2, изображения справа). Плоскость соответствует оси наблюдения при реализации эксперимента [6].

Первая стадия распространения дыма в помещении характеризуется наличием двух участков струйного течения газозвушной смеси от очага пожара. На начальном участке подмешивание окружающего воздуха в струю практически отсутствует. С увеличением высоты подъема струя уменьшается в горизонтальном сечении, и на некоторой высоте течение газов приобретает турбулентный характер с интенсивным подмешиванием окружающего воздуха в струйное течение. С указанной высоты начинается второй участок струйного течения с расширением по высоте за счет подмешивания окружающего воздуха (рис. 2а).

Вторая стадия наступает при достижении газозвушной струей потолка помещения, ее поворота на 90° и растекании вдоль потолка в виде веерной струи. Вторая стадия разделена на 2 области. Первая область – зона поворота струи, на которой подмешивание воздуха практически отсутствует. Вторая область – зона растекания вдоль плоскости потолка. Данная область имеет два слоя – внутренний, прилегающий к потолку, и внешний, соприкасающийся с внешней средой. Внешний слой за счет подмешивания воздуха имеет меньшую концентрацию дыма, что и видно по значению видимости в данной области (рис. 2б). С увеличением расстояния от точки соприкосновения оси восходящей струи с потолком концентрация дыма уменьшается (рис. 2в). Происходит это за счет уменьшения скорости и температуры во внутреннем слое и подмешивания воздуха во внешний слой. Длительность второй стадии заканчивается при достижении струей стен помещения.

Третья стадия характеризуется накоплением дыма под потолком; происходит выравнивание концентрации дыма (рис. 2г), поле становится более однородным (рис. 2д), зависимость концентрации дыма от расстояния до источника пожара сглаживается (рис. 2е, жс).



а) время моделирования 2 с; б) время моделирования 4 с; в) время моделирования 10 с;
 г) время моделирования 30,6 с; д) время моделирования 64,5 с; е) время моделирования 95 с;
 ж) время моделирования 150 с

Рисунок 2. – Результаты моделирования видимости при задымлении при $Y_s=0,082$

Это объясняется вовлечением в струйное течение (участок, соответствующий первой стадии) рециркуляционных потоков от стен помещения, содержащих в своем составе дым, что приводит к увеличению концентрации дыма в газоздушном потоке от источника пожара и формированию более однородных полей концентрации дыма.

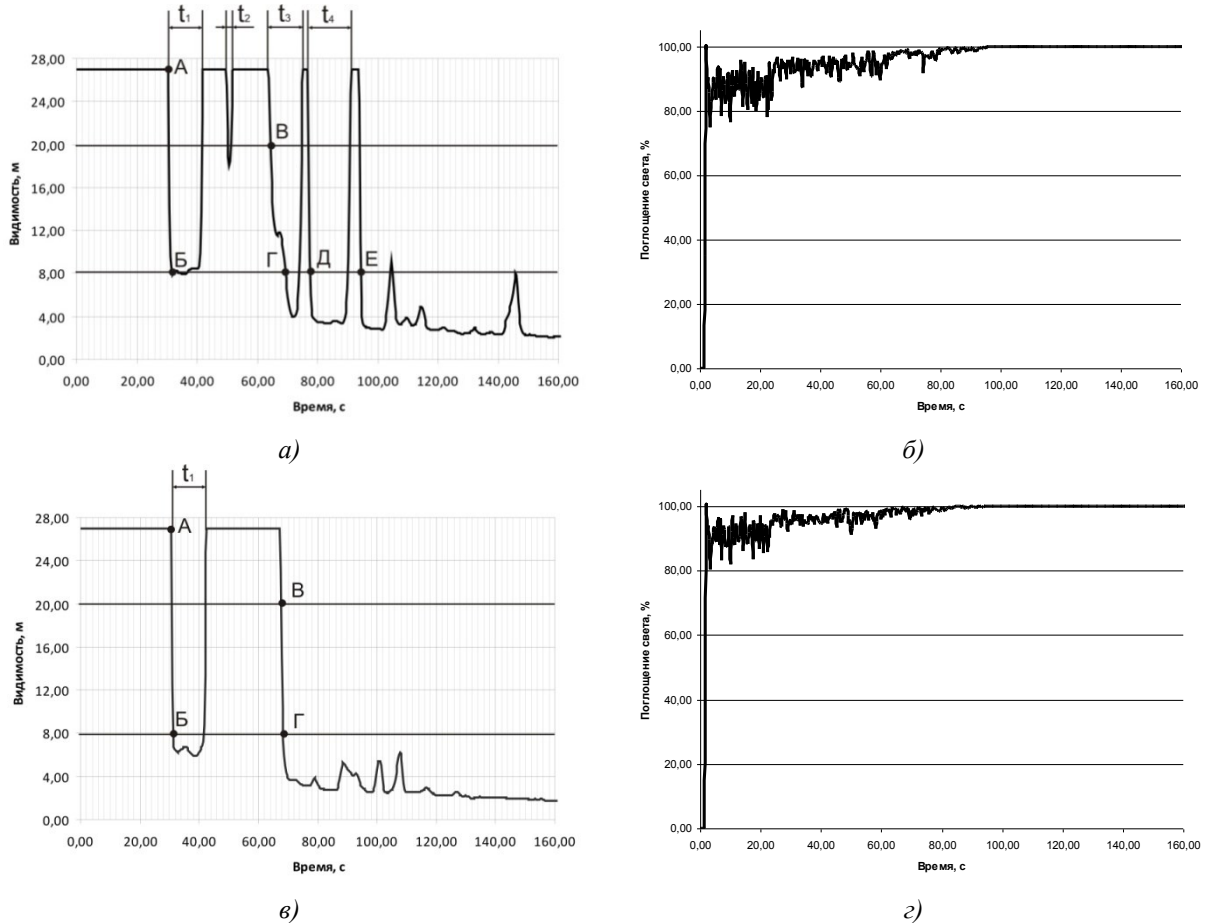
Из сказанного выше следует, что основные стадии задымления в помещении при моделировании в программе FDS соответствуют физической модели распространения продуктов горения в помещении при возникновении и развитии загораний [15].

Значения предельной видимости определялось на основе расчетов в FDS (графические зависимости приведены на рис. 3), распределения во времени полей предельной видимости (по плоскости slice Visibility) и моделированием визуального метода определения предельной дальности в программе SmokeView – программном комплексе, предназначенном для визуализации численных прогнозов, созданных с помощью программ, реализующих полевую (FDS) или зонную (CFAST) модели развития пожара [16]. Зависимости изменения предельной видимости и ослабления оптического излучения от времени горения образца, полученные при моделировании для двух значений удельного выхода дыма Y_s , приведены на рисунке 3.

Из приведенных графиков видно, что зависимость предельной видимости на первоначальном этапе развития пожара имеет несколько участков, при которых значение периодически уменьшается, а затем становится равным начальному. Это обуславливается окончанием второй и наступлением третьей стадии распространения дыма в помещении, т. е. достижением газоздушной струей, переносимой дым, стены, перпендикулярной оси наблюдения, формированию рециркуляционных потоков газоздушной смеси от стены с дальнейшим продвижением их в направлении очага горения. С увеличением слоя дыма в припотолочной части помещения и достижением нижней его границы высоты размещения точки наблюдения предельная видимость резко снижается. С продвижением газоздушной смеси, обусловленным формированием рециркуляционных ее потоков, к очагу горения нижняя граница слоя дыма поднимается вверх. Далее следующая «порция» дыма достигает стены, перпендикулярной оси наблюдения, и слой дыма вновь опускается ниже высоты точки наблюдения. Этот процесс повторяется и постепенно приводит к формированию однородной концентрации дыма в припотолочном пространстве и опусканию нижней границы его слоя.

В рассматриваемом нами примере время наступления предельной видимости на расстоянии 27 метров составило 30,6 секунд от начала горения как для $Y_s=0,082$, так и для $Y_s=0,097$ (точки А на рисунках 3а и 3в). Ослабление света составило 93,7 % и 97,1 % соответственно.

При этом предельная видимость в точке размещения соответствующего датчика снизилась до 8,0 и 6,3 м для каждого значения Y_s . Интервал времени уменьшения предельной видимости t_i (рис. 3а и 3в) составил 11,4 с при $Y_s=0,082$, и 12,0 с при $Y_s=0,097$. При этом в модели для $Y_s=0,097$ предельная видимость составляла менее 8 м на протяжении 10,2 с (рис. 3в).

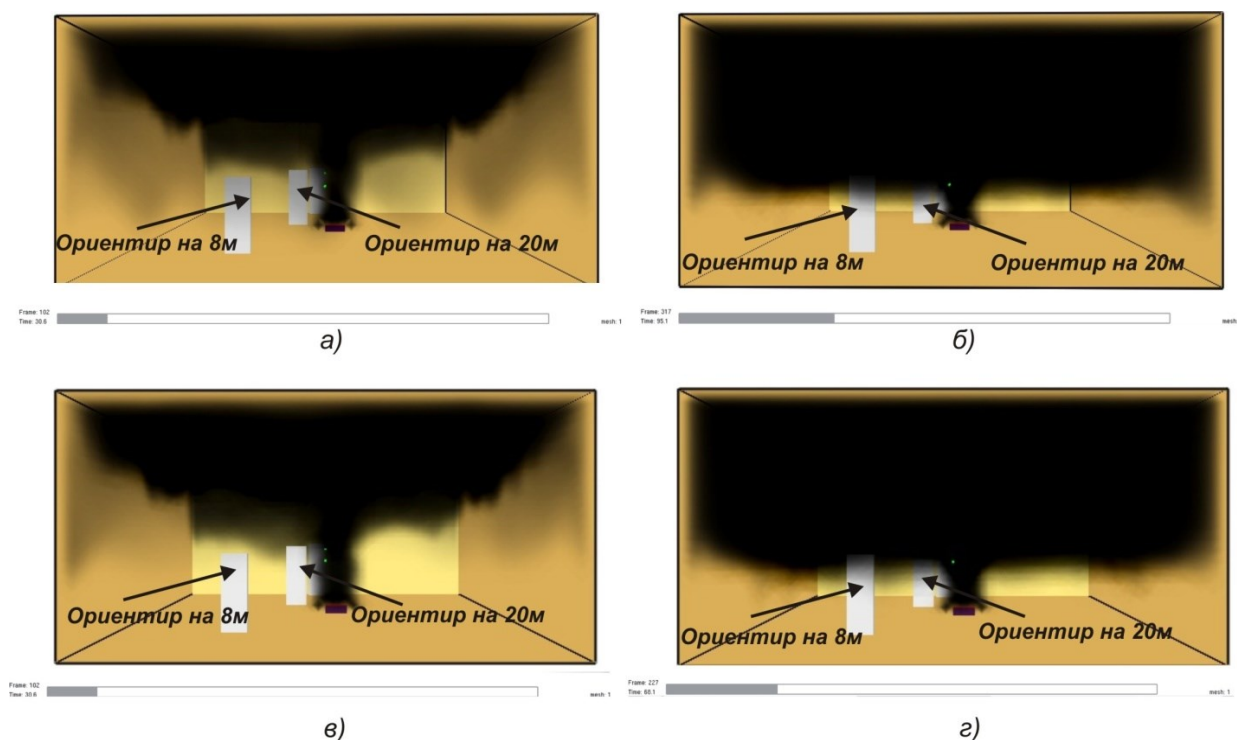


- а) зависимость изменения видимости при удельном выходе дыма $Y_s=0,082$;
- б) зависимость поглощения оптического излучения при удельном выходе дыма $Y_s=0,082$;
- в) зависимость изменения видимости при удельном выходе дыма $Y_s=0,097$;
- г) зависимость поглощения оптического излучения при удельном выходе дыма $Y_s=0,097$

Рисунок 3. – Зависимости изменения предельной видимости и поглощения оптического излучения моделирования

Первоначальная потеря видимости при моделировании связана с неоднородностью поля концентрации дыма, что для варианта $Y_s=0,082$ наглядно показано на рисунке 2г (точка А): расчетная точка ориентира на высоте 1,5 м находится ровно на границе перехода от значения видимости в 27 м к меньшему значению. Ориентир, размещенный на расстоянии в 8 м от точки наблюдения, полностью находится в зоне видимости в 27 м. Аналогичная ситуация наблюдалась при анализе полей распределения видимости для величины параметра $Y_s=0,097$.

При моделировании визуальной оценки в программе SmokeView ориентир, размещенный на расстоянии 27 м, на высоте 1,5 м (высота установки датчика видимости) не просматривается (рис. 4а, в), а ориентир на 8 м отчетливо виден.



а) время моделирования 30,6 с для $Y_s=0,082$; б) время моделирования 95 с для $Y_s=0,082$;
 в) время моделирования 30,6 с для $Y_s=0,097$; г) время моделирования 68 с для $Y_s=0,097$

Рисунок 4. – Моделирование задымления

При анализе зависимостей во времени полей предельной видимости и визуальной оценки задымления нами не учитывались кратковременные потери видимости ($t_3=4,2$ с и $t_4=12,3$ с) на расстоянии 8 м в моменты времени 31,8 с; 69,6 с и 77,1 с (рис. 3а, точки Б, Г и Д соответственно) для $Y_s=0,082$, а также в моменты времени моделирования, равные 31,2 с (рис. 3в, точка Б) для $Y_s=0,097$.

Время потери видимости на расстоянии 8 м наступило через 95 с (рис. 3а, точка Е) от начала горения для $Y_s=0,082$ и 68 с для $Y_s=0,097$ (рис. 3в, точка Г). Исследование зависимости полей распределения предельной видимости во времени (рис. 2е, точка Б) показало, что точка ориентира на высоте 1,5 м находится в поле предельной видимости около 8 м. Визуальная оценка потери видимости на расстоянии 8 м приведена на рисунке 4б, г. Ослабление света составило 99,8 % и 97,9 % соответственно.

Результаты экспериментов и моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты экспериментов и моделирования

№ п.п.	Параметр	Экспериментальные данные		Данные моделирования			
				$Y_s=0,082$		$Y_s=0,097$	
1	Длина помещения, м	27	27	28		28	
2	Предельная видимость, м	27	8	27	8	27	8
3	Измеритель оптической плотности, дБ/м	0,32	1,13	-	-	-	-
4	Интенсивность излучения, прошедшего через дым I , %	-	-	6,3	0,2	2,9	2,1
5	Значение коэффициента ослабления, Нп/м	0,074	0,260	0,099	0,216	0,126	0,139
6	Относительная погрешность, %	-	-	34	17	70	47

Полученные результаты для $Y_s=0,082$ сопоставимы по точности с погрешностями, приведенными в работе [17] (для измерения концентрации дыма – 33 %). При $Y_s=0,097$ значения погрешности моделирования относительно экспериментальных данных превысили величину погрешностей [17].

Время наступления потери видимости при задымлении $t_{кр}^{не}$, соответствующее [14], т. е. при $l_{np}=20$ м, при заданных значениях удельного массового показателя экстинкции σ_s , для

проверки его влияния на значение $t_{кр}^{н6}$, а также соответствующие расчетные значения коэффициента ослабления оптического излучения k (по данным Beam Detector Device) и расчетные значения предельной видимости $l_{пр(расч.)}$, определенные по формуле (4), приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Время наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости при моделировании

Удельный массовый показатель экстинкции $\sigma_s=10300 \text{ м}^2/\text{кг}$			Удельный массовый показатель экстинкции $\sigma_s=8700 \text{ м}^2/\text{кг}$		
Время наступления $t_{кр}^{н6}$, с	Коэффициент ослабления оптического излучения k , м^{-1}	Расчетное значение предельной видимости $l_{пр(расч.)}$, м	Время наступления $t_{кр}^{н6}$, с	Коэффициент ослабления оптического излучения k , м^{-1}	Расчетное значение предельной видимости $l_{пр(расч.)}$, м
30,9	0,091	24,7	30,9	0,082	27,4
50,4	0,077	29,2	67,8	0,121	18,6
64,5	0,111	20,3	–	–	–
77,1	0,095	23,7	–	–	–
93,9	0,128	17,6	–	–	–

На рисунке 5 приведены изображения в SmokeView (изображения слева, фронтальный вид), полученные в соответствующие таблице 4 моменты времени для $Y_s=0,082$, и горизонтальные плоскости распределения видимости slice Visibility (изображения справа, вид сверху).

Время определялось по аналогии с определением видимости на расстоянии 8 м, с учетом анализа численной зависимости (рис. 3), зависимости полей распределения предельной видимости во времени slice Visibility и моделирования визуальной оценки задымления (в программном комплексе SmokeView).

Наиболее близким расчетным значением предельной видимости $l_{пр}$ (20,3 м) к теоретическому (20,0 м) имеет значение коэффициента ослабления, полученное при времени моделирования, равном 64,5 с (рис. 3а, точка В).

Анализ распределения полей видимости (рис. 5, изображения справа) показал следующее:

- непосредственно ориентир не находится в поле видимости менее 20 м;
- при времени моделирования, равном 64,5 с, в поле зрения на расстоянии около 10 м от точки размещения наблюдателя имеется область протяженностью около 4 м вдоль оси наблюдения, в которой значение предельной видимости составляет от 10 до 14 м;
- имеется локальное увеличение концентрации дыма, оказывающее существенное влияние на итоговое расчетное значение коэффициента ослабления.

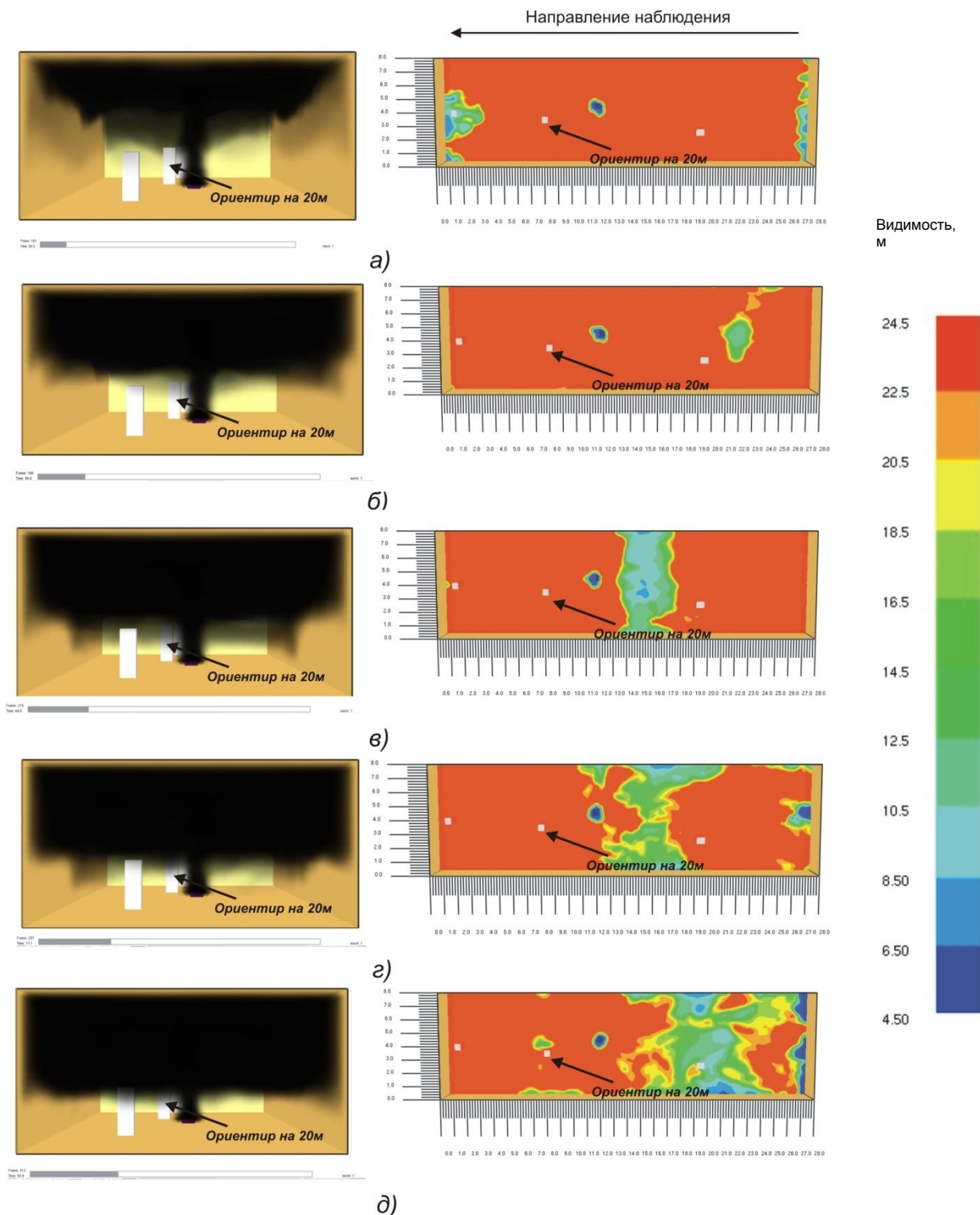
Результаты моделирования визуальной оценки задымления в программном комплексе SmokeView приведены на рисунке 5 (изображения слева). Изображения соответствуют моментам времени, указанным в таблице 4. При значениях времени моделирования 30,9 и 50,4 с верхний край ориентира, соответствующий расчетной точке, четко просматривается (рис. 5а и 5б). Потеря его видимости соответствует времени моделирования, равному 64,5 с (рис. 5в).

Таким образом, не были учтены интервалы времени уменьшения предельной видимости t_1 и t_2 для $Y_s=0,082$ (рис. 3а) и t_1 для $Y_s=0,097$ (рис. 3в). Исследуемое время составило 64,5 с для $Y_s=0,082$ (рис. 3а, точка В) и 67,8 с для $Y_s=0,097$ (рис. 3в, точка В). С учетом результатов сравнения экспериментальных данных [6] и результатов моделирования, приведенных выше, более корректное значение соответствует $Y_s=0,082$.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при определении времени наступления критического значения по потере видимости $t_{кр}^{н6}$ целесообразно проводить комплексную оценку полученных расчетных данных с использованием различного инструментария, предусмотренного в FDS.

По приведенным данным можно констатировать, что значение удельного массового показателя экстинкции σ_s , определенное согласно [5], влияет на время наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости $t_{кр}^{н6}$.

Выводы. В представленной работе проведено моделирование процесса определения предельной видимости в условиях задымления в программе FDS (Fire Dynamics Simulator). Полученные результаты сравниваются с результатами натурных исследований.



а) время моделирования 30,9 с; б) время моделирования 50,4 с; в) время моделирования 64,5 с; г) время моделирования 77,1 с; д) время моделирования 93,9 с

Рисунок 5. – Моделирование динамики задымления при расчете предельной видимости 20 м при $Y_s=0,082$

Лучшую сходимость с экспериментальными данными имеют значения Y_s , определенные с учетом работы [5], т. е. индивидуально для конкретной пожарной нагрузки. Учитывая аддитивность величины коэффициента дымообразования композиции различных горючих материалов, зависящей от массовой доли последних [18], целесообразно при вычислении Y_s применять значения удельного массового показателя экстинкции σ_s , приведенные в таблице 1. Это подтверждается результатами моделирования.

Проведенное моделирование показало, что при расчете времени потери видимости в помещении при задымлении, оно зависит от удельного показателя экстинкции σ_s , который применяется при определении удельного выхода дыма Y_s и предельной видимости l_{np} , определенного согласно [2, 3, 5].

Отсутствие учета физической модели задымления при оценке видимости в условиях пожара и, соответственно, при определении времени наступления потери видимости $t_{кр}^{ng}$, реализуемых в инженерных расчетах пожарных рисков, может приводить к некорректному определению данного параметра.

В частности, при расчете видимости в FDS с использованием датчика контроля газовой среды (Gas-phase Device Visibility) зависимость предельной видимости может иметь несколько участков снижения ее значения, не соответствующих зависимости видимости в реальных условиях. Это связано с особенностями модели задымления в помещении при пожаре.

Так как при использовании модельного датчика (Gas-phase Device Visibility) применяется выражение (4), учитывающее среднее значение коэффициента ослабления оптического излучения k , неравномерное распределение массовой концентрации дыма C_m (при достаточной точности расчетной сетки) приводит к возникновению минимумов предельной видимости, соответствующих локальному уменьшению видимости в месте размещения датчика. Данный вывод подтверждается экспериментальными исследованиями, расчетом коэффициента ослабления, проведенным анализом полей распределения видимости и моделированием визуального метода определения предельной дальности в программе SmokeView.

Оптимальным при расчете критических значений предельной видимости при задымлении в FDS, по нашему мнению, является комплексная оценка данного параметра по расчетным значениям ослабления оптического излучения (Beam Detector Device), полей распределения видимости в помещении (slice Visibility) и датчика контроля газовой среды (Gas-phase Device Visibility). Большую информативность и однозначность интерпретации полученных расчетных данных при анализе полей распределения видимости в помещении имеют плоскости, размещенные горизонтально на высоте, соответствующей высоте наблюдения (при оценке пожарных рисков принимаемой по умолчанию 1,7 м от уровня пола).

Применение значений σ_s , определенных согласно [5] при расчетах опасного фактора пожара по потере видимости, позволяет получить более точные значения по сравнению с [3].

С учетом того, что полевая модель, прежде всего, направлена на определение значений параметров среды в условиях пожара в каждой расчетной ячейке, более корректным является расчет Y_s для каждого материала, имеющегося в помещении, для которого строится модель, т. е. предложенный в рекомендациях [3] подход, основанный на применении типовой пожарной нагрузки [19], состоящей из различных материалов (мебель+ткани, хлопок+картон, мебель+бытовые изделия и др.), может быть усовершенствован. Последнее, несомненно, позволит повысить точность и корректность расчетов с применением программы FDS.

Определение возможности перевода коэффициента дымообразования D_m в удельный выход дыма Y_s путем решения аналитического уравнения (9) дает возможность последующего применения имеющегося массива данных по D_m различных материалов, приведенных в работе [20], при моделировании процесса изменения видимости при задымлении.

Учитывая особенности программы FDS 6.0 и результаты, полученные в настоящей работе, рекомендуется учитывать следующее:

– во входном файле непосредственно в FDS v.6.0 следует указывать значения σ_s : &SPEC ID='SOOT', MASS EXTINCTION COEFFICIENT= указать значения из таблицы 1, LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /.

– при моделировании пожаров с использованием пользовательского интерфейса FDS v.6.0 – программе PyroSim 2014 [21] – для учета σ_s на основании формул (4) и (6) целесообразно корректировать значение безразмерной постоянной характеристики типа объекта C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-90. – Введ. 12.12.89. – М.: Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Изд-во стандартов, 1990. – С.74–76.
2. NIST Special Publication 1019. Fire Dynamics Simulator (Sixth Edition). User's Guide. – NIST, 2017. – 339 p.
3. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. Редакция 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pyrosim.ru/polevaya-model-pozhara>. – Дата доступа: 30.11.2017.
4. Суриков, А.В. Исследование процесса дымообразования с применением CFD-модели / А.В. Суриков // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2014. – № 1 (9). – С. 34–40.
5. Mulholland, G.W. Specific extinction coefficient of flame generated smoke / G.W. Mulholland, C. Croarkin // Fire and Materials. – 2000. – Vol. 24. – № 5. – P. 227–230.
6. Суриков, А.В. Оптико-электронная система для улучшения видимости при задымлении / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк, Б.Ф. Кунцевич, В.А. Горобец // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 4–12.
7. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
8. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода расчета необходимого времени эвакуации людей: дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / Ю.С. Зотов; Высш. инж. пож.-техн. школа. – М., 1989. – 273 л.
9. Jin, T. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke / T. Jin // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – 3rd edition. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. – Section 2, Chapter 4. – P. 42–53.
10. Mulholland, G.W. Smoke Production and Properties / G.W. Mulholland // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – 3rd edition. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. – Section 2, Chapter 13. – Pp. 258–268.
11. Widmann, J.F. Measurement of the optical extinction coefficient of combustion-generated aerosol / J.F. Widmann, J. Duchezl, J.C. Yang, J.M. Conny, G.W. Mulholland // Aerosol Science. – 2005. – № 36. – P. 283–289.
12. 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. – P. 231–243.
13. Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://koverholt.com/fds-mesh-size-calc>. – Дата доступа: 20.11.2017.
14. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. – Введ. 14.06.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.
15. Шаровар, Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний / Ф.И. Шаровар. – М.: Стройиздат, 1988. – 335 с.
16. Forney, G.P. Smokeview (Version 6). A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume III: Verification Guide / Glenn P. Forney. – National Institute of Standards and Technology Special Publication 1017-3. – 2013. – 101 p.
17. Рекомендации по использованию программы FDS с применением программ PyroSim2012, SmokeView и «СИТИС: Фламмер 3.00» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.sitis.ru/doc>. – Дата доступа: 13.11.2013.
18. Леонович, А.А. Аддитивность коэффициента дымообразования композиционных материалов / А.А. Леонович, Э.В. Ани, Г.Н. Григорьев, Д.Х. Кулев // Безопасность людей при пожаре: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 97–100.
19. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
20. Суриков, А.В. Количественные характеристики оптического излучения, проходящего через задымленную среду / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк, В.О. Петухов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 14–18.
21. Руководство пользователя PyroSim 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pyrosim.ru/polevaya-model-pozhara>. – Дата доступа: 10.12.2017.

MODELING OF VISIBILITY IN A ROOM UNDER FIRE CONDITIONS WITH APPLICATION OF THE FDS SOFTWARE COMPLEX

Andrey Surikov

Nikolay Leshenyuk, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The article is devoted to comparing the results of visibility measurements in smoke conditions with simulation results in the FDS, as well as the influence of the choice of the specific mass extinction coefficient on the results of modeling the smoke optical properties and the time of the onset of the critical value of visibility loss in fire conditions.

Methods. Modeling the smoke in the room using the computational fluid dynamics model (CFD).

Findings. The performed simulation showed that when calculating the time of loss of visibility in a room during smoke, it depends on the specific extinction coefficient σ_s , which is used to determine the soot yield Y_s in the FDS. The best convergence with the experimental data has the values of Y_s , determined with an individual for a particular fire load.

Application field of research. The results can be applied in modeling fires.

Conclusions. It is advisable to use the values of σ_s for the material individually when calculating Y_s . This will improve the accuracy of calculations using the FDS.

Determination of the possibility of converting the smoke production factor D_m to Y_s by solving the analytical equation makes it possible for the subsequent application of the available data array on the smoke-forming capacity of various materials in modeling the process of changing the visibility in smoke.

The lack of consideration of the physical model of smoke in assessing visibility under fire conditions and, accordingly, in determining the time of onset of loss of visibility, implemented in engineering calculations of fire risks, may lead to incorrect determination of this parameter. The use of the value of σ_s for the materials in calculating fire risks allows obtaining more accurate values.

Keywords: modeling, visibility, smoke-forming ability, smoke yield, experimental studies.

(The date of submitting: February 7 2018)

REFERENCES

1. *Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Interstate Standard 12.1.044-90.* Affirmed 12.12.1989. Minsk: Minsktipproekt, 1990. Pp 74–76. (rus)
2. *NIST Special Publication 1019. Fire Dynamics Simulator (Sixth Edition). User's Guide.* NIST, 2017. 339 p.
3. *Rabota v programmnom komplekse FireCat. Biblioteka reaktsiy i poverkhnostey goreniya v PyroSim. Redakcia 4* [Work in the FireCat software package. Library of reactions and combustion surfaces in PyroSim. Revision 4], available at: <https://pyrosim.ru/polevaya-model-pozhara>. (accessed: November, 30, 2017) (rus)
4. Surikov A.V. Issledovanie protsessa dymoobrazovaniya s primeneniem CFD-modeli [Research of smoke generation with CFD-models]. *Chrezvychaynye situatsii: obrazovanie i nauka*. 2014. No. 1 (9). Pp. 34–40. (rus)
5. Mulholland G.W., Croarkin C. Specific extinction coefficient of flame generated smoke. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24. No. 5, Pp.227–230.
6. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuntsevich B.F. Gorobets V.A. Optoelectronic system to increase visibility in a smoky environment. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2014. No. 2 (20). Pp. 4–12. (rus)
7. Landsberg G.C. *Optika*. Moscow: Nauka, 1976. 928 p. (rus)
8. Zotov Y.C. *Protsess zadymleniya pomescheniy pri pozhare i razrabotka metoda rascheta neobkhodimogo vremeni evakuatsii lyudey* [The process of smoke pollution in a fire and the development of a method for calculating the necessary time for evacuation of people]: PhD. tech. sci. diss. Moscow, 1989. 273 p. (rus)
9. Jin T. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edition. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. Section 2, Chapter 4. Pp. 42–53.
10. Mulholland G.W. Smoke Production and Properties. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edition. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts. Section 2, Chapter 13. Pp. 258–268.

11. Widmann J.F., Duchezl J., Yang J.C., Conny J.M., Mulholland G.W. Measurement of the optical extinction coefficient of combustion-generated aerosol. *Aerosol Science*. 2005. No. 36. Pp. 283–289.
12. 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. Pp. 231–243.
13. *Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator*, available at: <https://koverholt.com/fds-mesh-size-calc> (accessed: November, 20, 2017).
14. *Fire safety. General requirements: Interstate Standard 12.1.004-91*. Affirmed 14.06.1991. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1991. 88 p. (rus)
15. Sharovar F.I. *Metody rannego obnaruzhenia zagoraniy*. Moscow: Stroyizdat, 1988. 335 p. (rus)
16. Glenn P. Forney *Smokeview (Version 6). A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume III: Verification Guide*. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1017-3, 2013. 101 p.
17. *Rekomendatsii po ispol'zovaniyu programmy FDS s primeneniem programm PyroSim2012, SmokeView i «SITIS: Flammer 3.00»* [Recommendations on using the FDS program with PyroSim2012, SmokeView and «CITIS: Flammer 3.00»], available at: <http://old.sitis.ru/doc> (accessed: November, 10, 2017). (rus)
18. Leonovich A.A., Ani E.V., Grigoryev G.N., Kulev D.H. Additivnost' koeffitsienta dymobrazovaniya kompozitsionnykh materialov [Additivity of the coefficient of smoke formation of composite materials]. *Proc. Sci. Conf. Bezopasnost' ludey pri pojare*. Moscow: VNIPO, 1984. Pp. 97–100. (rus)
19. Koshmarov Y.A. *Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii: uchebnoe posobie* [Forecasting of dangerous fire factors in the room: a tutorial]. Moscow: Akademiya GPS MVD Rossii, 2000. 118 p. (rus)
20. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Petuhov V.O. Kolichestvennye kharakteristiki opticheskogo izlucheniya, prokhodyashchego cherez zadymlennuyu sredu [Quantitative characteristics of optical radiation passing through a smoke]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2011. No 2 (14). Pp. 14–18. (rus)
21. *Rukovodstvo pol'zovatelya PyroSim 2014* [User Manual PyroSim 2014], available at: <https://pyrosim.ru/polevaya-model-pozhara> (accessed: December, 10, 2017). (rus)