

УДК 614.841

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FDS ПРИ РАСЧЕТЕ ВИДИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ЗАДЫМЛЕНИЯ

Суриков А.В., Лешенюк Н.С.

Проведен анализ методики определения значений расчетных параметров, применяемых при моделировании пожаров в программном комплексе FDS для расчета динамики задымления в помещении. Показано, что существующие подходы к определению значений расчетных параметров дымообразования справедливы только при полном сгорании материалов в условиях стандартных испытаний на дымообразующую способность. Для учета неполноты сгорания материалов проведен анализ экспериментальных данных по остатку массы материалов, для которых определен коэффициент дымообразования. В результате в расчетные формулы введены соответствующие коэффициенты, значительно повышающие точность проводимых расчетов динамики задымления в помещении.

Ключевые слова: моделирование, видимость, дымообразующая способность, удельный выход дыма, фактор видимости, удельный показатель экстинкции.

(Поступила в редакцию 27 мая 2018 г.)

Введение. В настоящее время наиболее универсальным методом моделирования развития пожара служит полевой метод, не накладывающий ограничений на геометрические характеристики объекта и позволяющий проводить наиболее детальный анализ развития пожара [1].

Одной из самых востребованных компьютерных программ, реализующих полевую модель, – расчетный программный комплекс FDS (NIST, США).

При моделировании задымления в условиях пожара в FDS основными параметрами, влияющими на дымообразование и видимость, являются удельный выход дыма Y_s (soot yield), удельный массовый коэффициент (показатель) экстинкции σ_s (mass extinction coefficient) и фактор видимости (visibility factor) C [2, с. 234].

Удельный выход дыма Y_s определяется как доля горючего материала, идущего на образование дыма [2, с. 150]. Значение удельного выхода дыма Y_s , равное 0,01, означает, что массовая скорость выделения дыма составляет 0,01 от скорости выгорания топлива [2, с. 201]. Таким образом, Y_s определяет значение массовой концентрации дыма в заданный момент времени.

В теории распространения света через аэрозоли удельный массовый показатель (коэффициент) экстинкции σ_s характеризуется как показатель ослабления света на заданной длине волны на единицу массы аэрозоля. Значение удельного массового показателя экстинкции σ_s в FDS стандартно принимается равным $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ вне зависимости от горючего материала [2, с. 235]. Значения σ_s для различных твердых горючих материалов и горючих жидкостей приведены в работе [8]. В работе [9] показано, что при расчетах наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости в FDS применение значений σ_s , определенных согласно [8], позволяет получить значения, более приближенные к экспериментальным по сравнению со значением, равным $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Следует также отметить, что значение удельного массового показателя экстинкции σ_s играет роль при определении удельного выхода дыма Y_s . Это обусловлено тем, что в отечественной практике моделирования пожаров параметром, характеризующим дымообразующую способность материалов, служит коэффициент дымообразования D_m – показатель, определяемый специальными испытаниями согласно методике [10] и характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или термоокислительной деструкции (тлении) определенного количества твердого вещества (материала).

Так, согласно ряду публикаций [11–13] определено, что коэффициент дымообразования D_m прямо пропорционален произведению удельного массового показателя экстинкции σ_s и удельного выхода дыма Y_s .

Фактор видимости C зависит от освещенности объекта наблюдения, коэффициента отражения его поверхности и яркостного порога зрения человека в условиях задымления [14]. Анализ немногочисленных литературных источников, в которых приведены примеры

расчетов опасных факторов пожара с использованием полевой модели развития пожара [15, 16], позволяет сделать вывод о том, что при практических расчетах не учитываются параметры, влияющие на фактор видимости C , – освещенность объекта наблюдения E , яркостный порог зрения человека в условиях задымления $B_{кр}$ и коэффициент отражения объекта α .

Целью данной работы была разработка методических подходов к повышению точности расчетов видимости при задымлении в помещении с применением полевой модели развития пожара.

Основная часть. Известно, что при моделировании задымления в условиях пожара предельная видимость в дыму определяется по формуле

$$l_{np} = \frac{C}{k} = \frac{C}{\sigma_s C_m}, \quad (1)$$

где C – безразмерная характеристика типа объекта, рассматриваемого в дыму, или фактор видимости ($C = 5 \div 10$ для объекта, излучающего свет; $C = 2 \div 4$ для светоотражающего объекта; согласно ГОСТ 12.1.004-91 [4] при обычных условиях $C = 2,38$); k – коэффициент ослабления оптического излучения, m^{-1} ; σ_s – удельный массовый показатель (коэффициент) экстинкции, m^2/kg ; C_m – массовая концентрация дыма, kg/m^3 [2, 4–6].

Процесс переноса дымовых частиц и изменение концентрации дыма в FDS описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla (\rho Y_\alpha (u + u_p)) = \nabla (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + m_\alpha, \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, kg/m^3 ; Y_α – массовая доля частиц дыма, равная отношению C_m/ρ ; u – скорость движения газовой среды, m/s ; u_p – скорость движения дымовых частиц, m/s ; D_α – коэффициент диффузии, m^2/s ; m_α – массовая скорость образования частиц дыма в заданной химической реакции, $kg/(m^3 \cdot c)$ [7].

В FDS принято, что дым от пожара (массовая скорость образования частиц дыма в заданной химической реакции m_α) образуется пропорционально скорости тепловыделения, определяемой как произведение низшей теплоты сгорания материала и массовой скорости его выгорания [2, с. 201]. При этом в качестве коэффициента пропорциональности между массой сгоревшего материала и массой образовавшегося дыма выступает удельный выход дыма Y_s [18, с. 3–255].

При моделировании динамики развития пожара в FDS удельный выход дыма Y_s является величиной, которую задает пользователь. Существует ряд методов определения Y_s . Например, метод контроля воздушного потока заключается в измерении массы фильтра, через который проходит дым, возникающий при горении исследуемого материала. При этом контролируется изменение массы образца [23].

Значение удельного выхода дыма Y_s составляет до 20 % от массы горючего материала [17]. Наиболее значительный массив данных по Y_s приведен в [18, с. 3–142]. В российской и отечественной практике принято определять Y_s из соотношения

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

где D_m – коэффициент дымообразования; σ_s – удельный массовый показатель (коэффициент) экстинкции, m^2/kg .

При этом следует учитывать, что согласно ГОСТ 12.1.044-90 [10] коэффициент дымообразования D_m определяется на основании данных, полученных при испытаниях по стандартизированной методике, по формуле

$$D_m = \frac{V}{mL} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (4)$$

где V – объем испытательной камеры, m^3 ; m – начальная масса образца, kg ; L – длина пути оптического луча, m ; I_0 – интенсивность падающего света; I – интенсивность передаваемого света.

Уточнение определения значения Y_s . Следует отметить, что соотношение (3) будет справедливо лишь при полном сгорании испытуемого образца, так как при определении Y_s учитывается доля всего сгоревшего материала, идущего на образование дыма.

В большинстве случаев в условиях испытаний по определению D_m наблюдается неполное сгорание исследуемых образцов при достижении максимального ослабления свето-

вого потока, принимаемого для расчета D_m согласно формуле (4). Таким образом, значения D_m при неполном сгорании материалов, применяемые для определения Y_s , будут занижены, что, несомненно, будет влиять на определение времени наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости при его моделировании.

Сведений по остатку материалов, подвергнутых испытаниям на определение D_m , в доступных литературных источниках имеется достаточно ограниченное количество [19, 20].

В проведенных авторами данной работы исследованиях [12] экспериментальное определение D_m по ГОСТ 12.1.044-90 [10] с последующим моделированием данного процесса в FDS проводилось именно с учетом массы сгоревших образцов для определения корректности применения выражения (3). При этом были получены следующие результаты относительной погрешности при моделировании по сравнению с экспериментальными данными: древесностружечная плита – 6 %, поливинилхлорид – 24 %, пенополистирол – 20 %. Полученные данные вполне сопоставимы по точности с погрешностями, приведенными в работе [21] (для измерения концентрации дыма – 33 %).

В ходе экспериментального определения D_m средняя масса остатка образцов составила: древесностружечная плита – 21 % (начальная масса – 19,1 грамма, конечная – 4,0 грамма), поливинилхлорид – 25 % (начальная масса – 2,72 грамма, конечная – 0,67 грамма), пенополистирол – 0 % (начальная масса – 0,43 грамма, конечная – 0 граммов).

Это означает, что при определении D_m по формуле (4) согласно ГОСТ 12.1.044-90 [10] с учетом начальной массы образца, его значение будет меньше коэффициента, определенного для значения массы сгоревшего образца в условиях стандартных испытаний. Соответственно меньшим будет и значение Y_s , что будет сказываться на результатах моделирования динамики задымления в помещениях в условиях пожара в сторону увеличения времени наступления критического значения оптической плотности дыма.

Значения доли сгоревшей массы ряда материалов, полученные при исследовании их коэффициента дымообразования, приведены в таблице 1 [12, 19, 20].

Таблица 1. – Значение доли сгоревшей массы образцов материалов при определении их коэффициента дымообразования по ГОСТ 12.1.044-90

Материал	Значение доли сгоревшей массы образца
Древесностружечная плита	0,79±0,05
Поливинилхлорид	0,75±0,03
Древесноволокнистая плита	0,81±0,04
Картон	0,96±0,03

Таким образом, для более корректного перевода коэффициента дымообразования D_m в удельный выход дыма Y_s необходимо в аналитическое выражение (3) ввести коэффициент A , учитывающий неполное сгорание материалов при определении D_m по стандартизированной методике [10]:

$$D_m = AY_s\sigma_s, \quad (5)$$

где A – коэффициент, учитывающий неполное сгорание материалов при определении коэффициента дымообразования, т. е. значение доли сгоревшей массы образца.

В дополнение к изложенному необходимо отметить, что согласно действующей методике за коэффициент дымообразования D_m исследуемого материала принимают большее значение, вычисленное для двух режимов испытания – тления и горения [10, п. 4.18.4.2]. Как показано в работе [22], для большинства материалов значение коэффициента дымообразования D_m в режиме тления выше, чем в режиме пламенного горения. По этой причине данные значения указываются в справочной литературе и нормативных документах. При переводе D_m в Y_s согласно (5) значение удельного массового коэффициента экстинкции σ_s , принимаемое по умолчанию в FDS равным 8700 м²/кг, соответствует режиму пламенного горения, что и указано в работе [8]. Для дыма, выделяемого в режиме тления, коэффициент σ_s равен 4000–5000 м²/кг [8].

Из приведенного выше следует, что при моделировании пожаров в FDS целесообразно применять значения коэффициента дымообразования с учетом протоколов испытаний конкретных материалов на дымообразующую способность именно для режима горения.

Уточнение выбора значения σ_s . Массовая концентрация дыма C_m не определяет его оптические свойства, а является коэффициентом пропорциональности между предельной видимостью в дыму и удельным коэффициентом экстинкции σ_s (см. (1)), который

сложным образом зависит от дисперсности дыма, длины волны оптического излучения и химического состава вещества. Дым, образованный при горении различных материалов, имеет различные значения размера частиц, отличается и их химический состав, и, соответственно, разные величины σ_s . Таким образом, при одинаковом значении C_m , но при горении различных материалов предельная видимость l_{np} в дыму будет отличаться.

В дополнение, как было указано выше, в отечественной практике σ_s оказывает влияние на определение массовой скорости образования частиц дыма в заданной химической реакции m_a (3).

Из вышеперечисленного следует: корректность применения значений σ_s является крайне важной при определении значений исходных данных для проведения расчетов задымления в FDS.

На основании данных по значениям удельного выхода дыма Y_s [18], данных по коэффициентам дымообразования D_m [22] и формулы (3) нами были рассчитаны значения удельного коэффициента экстинкции $\sigma_{s(расч)}$ для ряда материалов и проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными значениями σ_s , приведенными в ТКР 45-2.04-153-2009 [3]. Полученные результаты сведены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов удельного коэффициента экстинкции σ_s

Материал	Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг	Удельный выход дыма Y_s	Удельный коэффициент экстинкции $\sigma_{s(расч)}$, м ² /кг	Удельный коэффициент экстинкции σ_s , м ² /кг
Древесина (включая материалы на ее основе)	23–108	0,015	1533–7200	8100
Поливинилхлорид	138–887	0,076–0,098	1816–9051	9500
Полистирол	471–1144	0,164	2872–6976	9800
Резина	667–850	0,097	6876–8763	10300
Полиуретан	164	0,104–0,130	1262–1577	8100±1100
Полиэтилен	450	0,06	7500	8800±2500

Полученные данные свидетельствуют о том, что при определении удельного коэффициента экстинкции $\sigma_{s(расч)}$ по формуле (3) на основании массива данных по коэффициенту дымообразования D_m и значениям удельного выхода дыма Y_s , значения $\sigma_{s(расч)}$ практически для всех материалов значительно меньше по сравнению с экспериментальными данными [8].

Таким образом, при расчете предельной видимости при пожаре в дыму l_{np} (1) будет получено завышенное значение, что соответственно приведет к увеличению времени наступления критического значения опасного фактора пожара по потере видимости. В то же время при определении удельного выхода дыма Y_s с учетом экспериментальных данных [8] (3) его значение будет занижено, что соответственно скажется на уменьшении массовой скорости образования частиц дыма m_a в заданной химической реакции.

Исходя из принципов проведения расчетов по оценке пожарной опасности объектов, заключающихся в определении наиболее неблагоприятного в отношении пожара варианта [23], и приведенных выше результатов следует:

1. При определении удельного выхода дыма Y_s в случае наличия экспериментальных данных для конкретного материала (например, согласно [18]) целесообразно применять в расчетах указанные значения, так как они будут выше, чем определенные по формуле (3). Это в свою очередь не уменьшит массовую скорость образования частиц дыма в заданной химической реакции m_a .

2. При определении удельного коэффициента экстинкции σ_s необходимо принимать значения согласно работе [8]. Данный подход позволит более адекватно определить предельную видимость в дыму l_{np} .

Уточнение безразмерной характеристики типа объекта, рассматриваемого в дыму, или фактора видимости C . Безразмерная характеристика типа объекта, рассматриваемого в дыму, или фактор видимости C , зависит от освещенности объекта наблюдения E , яркостного порога зрения человека в условиях задымления $B_{кр}$, коэффициента отражения объекта α [14] и с учетом результатов работы [14] определяется по формуле

$$C = \ln\left(\frac{\alpha E_0}{\pi B_{кр}}\right) = \ln(1,05\alpha E_0). \quad (6)$$

В обычных условиях критическое значение C принимается равным 2,38 [4, 5, 15, 16, 24]. Время блокирования путей эвакуации по опасному фактору пожара по потере видимости определяется в момент времени, при котором коэффициент ослабления оптического излучения k принимается равным $0,119 \text{ м}^{-1}$, что соответствует предельной видимости $l_{пр}$ в 20 метров. При этом при расчете времени наступления критического значения оптической плотности дыма освещенность объекта наблюдения E принимается равной 50 лк, а значение коэффициента отражения объекта $\alpha - 0,3$.

При проектировании освещения в зданиях принимаются следующие значения средневзвешенного коэффициента отражения внутренних поверхностей проектируемого помещения: 0,5 – в жилых и общественных помещениях и 0,4 – в производственных помещениях и помещениях объектов коммунального назначения [3]. Указанные значения могут применяться при моделировании пожаров с использованием интегральной модели развития пожара.

Значение α , равное 0,3, соответствует коэффициенту отражения силикатного кирпича и бетона [25]. Значения α для образцов цвета наиболее распространенных красок, пигментов и материалов приведены в строительных нормах [25].

Нормативные значения освещенности E помещений, зависящие от их назначения, определяются согласно [3] и составляют, как правило, от 50 до 500 лк. В таблице 3 приведены результаты расчета значений фактора видимости C для различных поверхностей (материалов и поверхностей, окрашенных наиболее распространенными красками при различном весовом содержании чистого пигмента в красочном составе (насыщенность краски M)) в зависимости от освещенности в помещении E . В таблице выделены подчеркиванием цвета красок, для которых при определенной освещенности значение фактора видимости C , меньше стандартного значения, равного 2,38.

Таблица 3. – Значения фактора видимости C для различных поверхностей в зависимости от освещенности в помещении E

Наименование пигмента (поверхности)	Насыщенность краски M , %	Коэффициент отражения α	Значение фактора видимости C при освещенности в помещении E , лк							
			50	75	100	150	200	300	400	500
А. Краски и пигменты										
Свинцовые белила	100	0,9	3,86	4,26	4,55	4,95	5,24	5,65	5,93	6,16
Кость жженая	10	0,2	2,26	2,66	2,95	3,36	3,64	4,05	4,34	4,56
	5	0,3	2,73	3,14	3,43	3,83	4,12	4,52	4,81	5,04
	2	0,4	2,97	3,37	3,66	4,07	4,35	4,76	5,05	5,27
	1	0,5	3,30	3,71	3,99	4,40	4,69	5,09	5,38	5,60
	0,5	0,6	3,40	3,80	4,09	4,49	4,78	5,19	5,47	5,70
	0,25	0,6	3,50	3,91	4,20	4,60	4,89	5,29	5,58	5,80
Краплак красный	20	0,2	2,25	2,65	2,94	3,34	3,63	4,04	4,33	4,55
	6	0,2	2,45	2,85	3,14	3,55	3,83	4,24	4,53	4,75
	2,5	0,3	2,76	3,16	3,45	3,86	4,14	4,55	4,84	5,06
	1	0,4	2,97	3,37	3,66	4,07	4,35	4,76	5,05	5,27
	0,5	0,4	3,14	3,55	3,83	4,24	4,53	4,93	5,22	5,44
	0,25	0,5	3,31	3,71	4,00	4,41	4,69	5,10	5,39	5,61
Кадмий пурпурный	30	0,1	1,99	2,40	2,69	3,09	3,38	3,79	4,07	4,30
	20	0,2	2,25	2,65	2,94	3,34	3,63	4,04	4,33	4,55
	6	0,3	2,91	3,31	3,60	4,01	4,29	4,70	4,99	5,21
	2,5	0,5	3,27	3,68	3,96	4,37	4,66	5,06	5,35	5,57
	1	0,6	3,45	3,86	4,15	4,55	4,84	5,25	5,53	5,76
	0,5	0,7	3,55	3,96	4,24	4,65	4,94	5,34	5,63	5,85

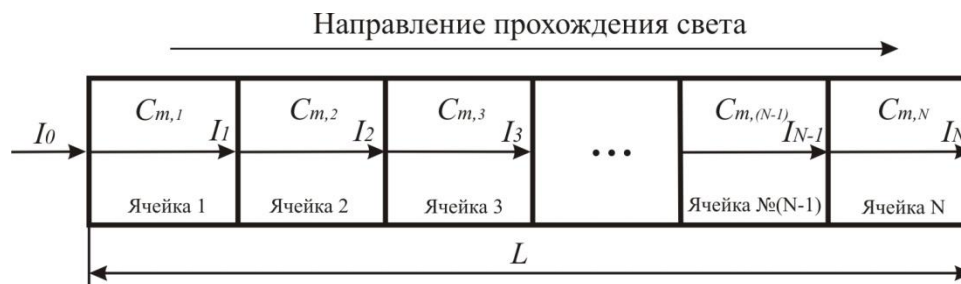
Продолжение таблицы 3

Наименование пигмента (поверхности)	Насыщенность краски M , %	Коэффициент отражения a	Значение фактора видимости C при освещенности в помещении E , лк							
			50	75	100	150	200	300	400	500
Охра красная	40	0,2	2,26	2,67	2,96	3,36	3,65	4,05	4,34	4,57
	16	0,3	2,70	3,11	3,40	3,80	4,09	4,49	4,78	5,00
	2	0,5	3,33	3,73	4,02	4,43	4,71	5,12	5,41	5,63
	1	0,7	3,58	3,99	4,27	4,68	4,97	5,37	5,66	5,88
	0,5	0,7	3,59	4,00	4,28	4,69	4,98	5,38	5,67	5,89
	0,25	0,7	3,67	4,08	4,36	4,77	5,06	5,46	5,75	5,97
Б. Материалы										
Алюминий матовый		0,55	3,36	3,77	4,06	4,46	4,75	5,15	5,44	5,67
Жесть:										
белая		0,6	3,45	3,86	4,14	4,55	4,84	5,24	5,53	5,75
оцинкованная		0,2	2,35	2,76	3,04	3,45	3,74	4,14	4,43	4,65
Лагунь матовая		0,55	3,36	3,77	4,06	4,46	4,75	5,15	5,44	5,67
Штукатурка (без побелки):										
новая		0,42	3,09	3,50	3,79	4,19	4,48	4,89	5,17	5,40
хорошо сохранившаяся		0,2	2,35	2,76	3,04	3,45	3,74	4,14	4,43	4,65
запущенная (в помещениях с темной пылью)		0,15	2,06	2,47	2,76	3,16	3,45	3,86	4,14	4,37
Силикатный кирпич и бетон:										
новые		0,32	2,82	3,23	3,51	3,92	4,21	4,61	4,90	5,12
хорошо сохранившиеся		0,2	2,35	2,76	3,04	3,45	3,74	4,14	4,43	4,65
запущенные в (помещениях с темной пылью)		0,1	1,66	2,06	2,35	2,76	3,04	3,45	3,74	3,96
Плитка белая керамическая глазурованная		0,75	3,67	4,08	4,37	4,77	5,06	5,46	5,75	5,98
Красный кирпич		0,1	1,66	2,06	2,35	2,76	3,04	3,45	3,74	3,96
Дерево:										
сосна светлая		0,5	3,27	3,67	3,96	4,37	4,65	5,06	5,35	5,57
фанера		0,38	2,99	3,40	3,69	4,09	4,38	4,78	5,07	5,30
Известковая побелка:										
новая		0,8	3,74	4,14	4,43	4,84	5,12	5,53	5,82	6,04
хорошо сохранившаяся		0,65	3,53	3,94	4,22	4,63	4,92	5,32	5,61	5,83
запущенная (в помещениях с темной пылью)		0,15	2,06	2,47	2,76	3,16	3,45	3,86	4,14	4,37
Белая клеевая краска		0,7	3,60	4,01	4,30	4,70	4,99	5,40	5,68	5,91
Алюминиевая краска		0,5	3,27	3,67	3,96	4,37	4,65	5,06	5,35	5,57

Фактор видимости для светоотражающих объектов изменяется в диапазоне от 2 до 4 [6]. Анализ полученных результатов показывает, что в основном расчетные значения C соответствуют экспериментальным, полученным в работе [6], и находятся в указанном диапазоне при стандартной освещенности в 50 лк.

Однако для ряда материалов, а также определенных цветов поверхностей конструкций помещения расчетное значение C ниже 2,38, т. е. минимального значения при стандартной освещенности. На расчетное значение оказывают влияние и условия эксплуатации объекта. Так, при наличии отложений темной пыли на строительных конструкциях фактор видимости уменьшается на 30–40%. Полученные данные позволяют при расчете времени наступления критических значений опасного фактора пожара по потере видимости целенаправленно формировать компенсирующие мероприятия, направленные на увеличение указанного времени, путем выбора материалов отделочных материалов, увеличения освещенности помещений и выдачи рекомендаций по окраске конструкций.

Интерпретация выходных данных по коэффициенту ослабления k при расчете видимости при пожаре. В основе расчета прохождения света в полевой модели развития пожара лежит закон Бугера–Ламберта–Бера. Схематично распространение света приведено на рисунке 1.



$C_{m,1}-C_{m,N}$ – массовая концентрация дыма i -той ячейке, $\text{кг}/\text{м}^3$; I_0 – интенсивность падающего света;
 I_1-I_N – интенсивность света, прошедшего через i -тую ячейку;
 N – количество ячеек на заданной длине пути прохождения света L

Рисунок 1. – Модель распространения света

При этом

$$I_N = I_0 \exp \left[- \left(\sigma_s C_{m,1} \Delta L_1 + \sigma_s C_{m,2} \Delta L_2 + \sigma_s C_{m,3} \Delta L_3 + \dots + \sigma_s C_{m,N-1} \Delta L_{N-1} + \sigma_s C_{m,N} \Delta L_N \right) \right], \quad (7)$$

где ΔL_i – размер ячейки в горизонтальной плоскости, м. Учитывая, что ячейки расчетной сетки в помещении имеют одинаковую длину ΔL , имеем:

$$I_N = I_0 \exp \left(- \sigma_s \Delta L \sum_{i=1}^N C_{m,i} \right) = I_0 \exp \left(- \Delta L \sum_{i=1}^N k_i \right), \quad (8)$$

где k_i – коэффициент ослабления оптического излучения в i -той ячейке, м^{-1} .

Таким образом, при расчете времени наступления критического значения оптической плотности дыма необходимо учитывать интегральный коэффициент ослабления оптического излучения. В случае стандартных значений фактора видимости $C = 2,38$ и предельной видимости $l_{\text{пр}} = 20$ м среднее значение интегрального коэффициента ослабления равно $0,119 \text{ м}^{-1}$. Данный подход адекватен при применении интегральной модели развития пожара. В случае расчета с применением полевой модели следует учитывать, что распределение расчетной массовой концентрации дыма неоднородно и имеет различные значения в различных точках помещения. Аналогичным образом распределяются значения коэффициента ослабления k . Это приводит к тому, что в помещении могут быть участки, на которых k больше критического значения ($0,119 \text{ м}^{-1}$), и участки, на которых k гораздо меньше указанного значения. Данные положения наглядно продемонстрированы в работе [9].

Следовательно, принятие локальных значений коэффициента ослабления (например, в месте размещения эвакуационного выхода), соответствующих среднему значению (по умолчанию $0,119 \text{ м}^{-1}$), является некорректным. Соответственно, при расчете видимости в полевой модели необходимо учитывать значение интегрального коэффициента ослабления оптического излучения на всей протяженности пути наблюдения (в общем случае 20 м).

Выводы. При определении удельного выхода дыма Y_s в случае наличия экспериментальных данных для конкретного материала целесообразно применять в расчетах указанные значения, т. к. они, как правило, выше, чем определенные согласно аналитическому выражению (3). Это в свою очередь не приведет к уменьшению массовой скорости образования частиц дыма m_a в заданной химической реакции.

В случае отсутствия экспериментальных данных удельного выхода дыма Y_s допускается использование аналитического выражения (3) путем перевода значения коэффициента дымообразования D_m , определенного согласно стандартизированной методике [10]. При этом следует учитывать, что применение аналитического соотношения (3) корректно при полном сгорании испытуемого образца. Для более точного определения Y_s целесообразно использовать коэффициент A (5) для конкретных материалов, учитывающие неполное сгорание материалов при определении коэффициентов дымообразования. Ряд значений коэффициентов приведен в настоящей работе.

При моделировании пожаров в FDS для перевода коэффициента дымообразования D_m в удельный выход дыма Y_s целесообразно применять значения D_m с учетом протоколов испытаний конкретных материалов на дымообразующую способность для режима горения. Это обусловлено тем, что параметры моделирования в FDS приняты для пламенного горения, а в справочной литературе и нормативных документах, как правило, указываются значения D_m , соответствующие дыму, выделяемому в режиме тления материала.

При моделировании пожаров с применением полевой модели развития пожара значения удельного коэффициента экстинкции σ_s необходимо принимать согласно [8]. Данный подход позволит более адекватно определить предельную видимость в дыму $l_{пр}$.

Результаты расчета значения фактора видимости C для различных материалов и поверхностей, окрашенных наиболее распространенными красками, при различном весовом содержании чистого пигмента в красочном составе показывают, что для ряда материалов, а также для определенных цветов поверхностей конструкций помещения расчетное значение C ниже минимального нормируемого значения при стандартной освещенности. Также на значение фактора видимости оказывают влияние условия эксплуатации. В частности, накопление темной пыли на поверхности строительных конструкций значительно снижает значение C . Вышеуказанные факторы свидетельствуют о том, что при расчете видимости в условиях задымления необходимо учитывать освещенность, цветовую гамму окраски строительных конструкций и отделочных материалов и условия эксплуатации. Полученный массив данных может быть использован при разработке компенсирующих мероприятий, направленных на увеличение наступления критических значений оптической плотности дыма во времени при расчете необходимого времени эвакуации.

При интерпретации выходных данных расчета предельной видимости в условиях пожара с использованием полевой модели необходимо учитывать значение интегрального коэффициента ослабления оптического излучения по всей расчетной длине прохождения оптического излучения. Принятие локальных значений коэффициента ослабления (например, в месте размещения эвакуационного выхода), соответствующих среднему значению (по умолчанию $0,119 \text{ м}^{-1}$), является менее корректным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинцев, К.Ю. Разработка программы для моделирования пожаров в зданиях согласно методике определения расчетных величин пожарного риска [Электронный ресурс] / К.Ю. Литвинцев [и др.] // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: материалы IX Всеросс. конф. с межд. уч., Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г. / Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – Режим доступа: http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D1_S1-5.pdf. – Дата доступа: 20.05.2018.
2. Fire Dynamics Simulator. User's Guide / К. McGrattan et al. – 6th ed. – NIST, 2017. – 339 p.
3. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования = Натуральнае і штучнае асвятленне будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-2.04-153-2009 (02250). – Введ. 14.10.09 (с отменой на территории Респ. Беларусь СНБ 2.04.05-98). – Минск: Стройтехнорм, 2010. – 104 с.
4. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 14.06.1991. – М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с. – (Система стандартов безопасности труда).
5. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
6. Jin, T. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke / T. Jin // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno et al. – 4th ed. – Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2008. – Ch. 2–4. – P. 37–54.
7. Overholt, K.J. Computational Modeling and Validation of Aerosol Deposition in Ventilation Ducts / K.J. Overholt, J.E. Floyd, O.A. Ezekoye // Fire Technology. – 2016. – Vol. 52. – P. 149–166.
8. 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.
9. Суриков, А.В. Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS/A.В. Суриков, Н.С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С.147–160.
10. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-90. – Введ. 12.12.89. – М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Изд-во стандартов, 1990. – С. 74–76. – (Система стандартов безопасности труда).
11. Карькин, И.Н. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim [Электронный ресурс] / И.Н. Карькин // Официальный сайт ИП Карькин И.Н. – Режим доступа: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf. – Дата доступа: 30.11.2017.

12. Суриков, А.В. Исследование процесса дымообразования с применением CFD-модели / А.В. Суриков // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2014. – № 1 (9). – С. 34–40.
13. Карькин, И.Н. Методика расчета ОФП полевым методом / И.Н. Карькин, Г.В. Левинтовская // Екатеринбург: Ситис, 2007. – 11 с.
14. 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. – М., 1989. – 273 л.
15. Цвиркун, С.В. Расчет времени эвакуации людей с учебной аудитории при пожаре / С.В. Цвиркун, А.И. Березовский, Ю.В. Березовская // Науковий Вісник будівництва. – 2015. – № 1 (79). – С. 214–219.
16. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» / А.А. Абашкин [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ВНИИПО, 2014. – 226 с.
17. Kathryn, M.V. Generation and Transport of Smoke Components / M.V. Kathryn, G.W. Mulholland // Fire Technology. – 2004. – Vol. 40. – P. 149–176.
18. Mowrer, F.W. Enclosure Smoke Filling and Fire-Generated Environmental Conditions / F.W. Mowrer // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno et al. – 4th ed. – Quincy, Mass.: National Fire Protection Association. 2008. – Ch. 3–9. – P. 247–271.
19. Трушкин, Д.В. Совершенствование методологии определения пожарной опасности строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Д.В. Трушкин. – М., 2004. – 226 л.
20. Кочкин, А.Ю. Прогнозирование и контроль экологической опасности дымов: дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / А.Ю. Кочкин. – Братск, 2006. – 160 л.
21. Карькин, И.Н. Рекомендации по использованию программы FDS с применением программ PyroSim 2012, SmokeView и «СИТИС: Фламмер 3.00» / И.Н. Карькин, Н.А. Контарь, В.Ю. Грачев. – Екатеринбург: Ситис, 2009. – 65 с.
22. Суриков, А.В. Количественные характеристики оптического излучения, проходящего через задымленную среду / А.В. Суриков, Н.С. Лешенок, В.О. Петухов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 14–18.
23. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности = Катэгарыраванне памяшканняў, будынкаў і вонкавых устаноў па ўзрывапажарнай і пажарнай небяспекі: ТКП 474-2013 (02300). – Введ. 29.01.13 (с отменой на территории РБ НПБ 5-2005). – Минск: МЧС Респ. Беларусь, 2013. – 57 с.
24. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: приказ МЧС РФ, 30 июня. 2009 г., № 382 // Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90833. – Дата доступа: 10.03.2018.
25. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий: СН 181-70. – Введ. 01.10.70. – М.: Стройиздат, 1972. – 76 с.

DETERMINATION OF SIMULATION PARAMETERS VALUES AND OUTPUT DATA INTERPRETATION IN FDS DURING CALCULATING VISIBILITY IN SMOKE CONDITIONS

Andrey Surikov

Nikolay Leshenyuk, Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences, Professor

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 the development of methodological approaches to increasing the accuracy of visibility calculations for smoke in a room with the use of computational fluid dynamics model.

Methods. Experimental and analytical justification of the values of smoke modeling parameters.

Findings. The analysis of the method for determining the values of the calculated parameters used in the modeling of fires in the FDS software for calculating the dynamics of smoke in the room is analyzed. It is shown that the existing approaches to the determination of the values of the calculated parameters of smoke formation are valid only with complete combustion of materials under the conditions of standard tests for the smoke-forming ability. To take into account the incompleteness of combustion of materials, an analysis of the experimental data on the residue of the mass of materials, for which the smoke production coefficient was determined, was carried out.

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

Conclusions. When determining the specific soot yield in the case of experimental data for a particular material, it is advisable to use the indicated values in the calculations, since they are usually higher than those determined according to the analytical method.

The application of the analytical method is correct with complete combustion of the test sample. For a more correct determination of the soot yield, it is advisable to use coefficients that take into account the incomplete combustion of materials in determining the smoke production coefficients. Some values of the coefficients are given in this article.

When simulating fires in FDS for the conversion of the smoke factor to the soot yield, it is advisable to apply the values of the smoke generation factor taking into account the test protocols for specific materials for the combustion regime.

The data array obtained on the basis of the calculations of the value of the factor of visibility C for various materials and painted surfaces can be used to develop compensatory measures aimed at increasing the onset of critical values of the optical density of smoke in time when calculating the necessary evacuation time.

When interpreting the output data for calculating the ultimate visibility under fire conditions using a computational fluid dynamics model, it is necessary to take into account the value of the integrated light extinction coefficient over the entire calculated optical transmission length. The adoption of local values of the coefficient is less correct.

Keywords: modeling, visibility, smoke-forming ability, soot yield, visibility factor, specific extinction coefficient.

(The date of submitting: May 27, 2018)

REFERENCES

1. Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B. Razrabotka programmy dlya modelirovaniya pozharov v zdaniyakh soglasno metodike opredeleniya raschetnykh velichin pozhnogo riska [Development of a program for modeling fires in buildings in accordance with the method for determining the calculated values of fire risk]. *Proc. 9th All-Russian Conf. with international participation «Fuel burning: theory, experiment, applications»*, Novosibirsk, November 16–18, 2015. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the RAS, available at: http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt-2015/Files/D1_S1-5.pdf (accessed: May 20, 2018). (rus)
2. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., Weinschenk C., Overholt K. *Fire Dynamics Simulator. User's Guide*. 6th ed. NIST, 2017. 339 p.
3. *Estestvennoe i iskusstvennoe osveshchenie. Stroitel'nye normy proektirovaniya: TKP 45-2.04-153-2009 (02250)* [Natural and artificial lighting. Building Design Standards]. Affirmed 14.10.2009 (with cancellation in the territory of the Republic of Belarus SNB 2.04.05-98). Minsk: Stroytekhnorm, 2010. 104 p. (rus)
4. *Pozhnaraya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya: GOST 12.1.004 – 91* [Fire safety. General requirement]. Affirmed 14.06.1991. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po upravleniyu kachestvom

- produksii i standartam: Izdatel'stvo standartov, 1991. 88 p. (Sistema standartov bezopasnosti truda). (rus)
5. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii*: tutorial. Moscow: Akademiya GPS MVD Rossii, 2000. 118 p. (rus)
 6. Jin T. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* ed.: P.J. DiNenno et al. – 4th ed. – Quincy, Mass.: National Fire Protection Association. 2008. Ch. 2–4. Pp. 37–54.
 7. Overholt K.J., Floyd J.E., Ezekoye O.A. Computational Modeling and Validation of Aerosol Deposition in Ventilation Ducts. *Fire Technology*. 2016. Vol. 52. Pp. 149–166.
 8. Mulholland G.W., Croarkin C. Specific extinction coefficient of flame generated smoke. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24, No.5. Pp. 227–230.
 9. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Modeling of visibility in a room under fire conditions with application of the FDS software complex. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MChS Belarusi*. 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 147–160. (rus)
 10. *Pozharovzryvobezopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazateley i metody ikh opredeleniya: GOST 12.1.044 – 90* [Fire and explosion safety of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods for their determination]. Affirmed 12.12.89. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po upravleniyu kachestvom produktsii i standartam: Izdatel'stvo standartov, 1990. Pp. 74–76. (Sistema standartov bezopasnosti truda). (rus)
 11. Kar'kin I.N. *Rabota v programnom komplekse FireCat. Biblioteka reaktsiy i poverkhnostey goreniya v PyroSim* [Work in the FireCat software package. Reaction and combustion surfaces library in PyroSim], available at: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf. (accessed: November, 30, 2017). (rus)
 12. Surikov A.V. Issledovanie protsessa dymoobrazovaniya s primeneniem CFD-modeli [Research of smoke generation with CFD-models]. *Chrezvychaynie situatsii: obrazovanie i nauka*. 2014. No. 1 (9). Pp. 34–40. (rus)
 13. Kar'kin I.N., Levintovskaya G.V. *Metodika rascheta OFP polevym metodom* [Method for calculating the DFF field method]. Ekaterinburg: Sitis, 2007. – 11 p. (rus)
 14. Zotov Yu.S. *Protsess zadymleniya pomeshcheniy 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: 05.26.01. Moscow, 1989. 273 p. (rus)
 15. Tsvirkun S.V., Berezovskiy A.I., Berezovskaya Yu.V. Raschet vremeni evakuatsii lyudey s uchebnoy auditorii pri pozhare [Calculation of the time of evacuation of people from the classroom in case of fire] *Naukoviy Visnik budivnitstva*. 2015. No. 1 (79). Pp. 214–219. (rus)
 16. Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V., Fomin M.V., Giletich A.N., Komkov P.M. *Posobie po primeneniyu «Metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroeniyakh razlichnykh klassov funktsional'noy pozharnoy opasnosti»* [Manual on the application of «Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire danger»]. Moscow: VNIPO, 2014. – 226 p. (rus)
 17. Kathryn M.B., Mulholland G.W. Generation and Transport of Smoke Components. *Fire Technology*. 2004. Vol. 40. Pp. 149–176.
 18. Mowrer F.W. Enclosure Smoke Filling and Fire-Generated Environmental Conditions. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Ed.: P.J. DiNenno et al. 4th ed. Quincy, Mass. National Fire Protection Association. 2008. Ch. 3–9. Pp. 247–271.
 19. Trushkin D.V. *Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya pozharnoy opasnosti stroitel'nykh materialov* [Perfection of the methodology for determining the fire hazard of building materials]. Phd. tech. sci. diss: 05.26.03. Moscow, 2004. 226 p. (rus)
 20. Kochkin A.Yu. *Prognozirovaniye i kontrol' ekologicheskoy opasnosti dymov* [Forecasting and controlling the environmental hazards of fumes]. PhD. tech. sci. diss. Synopsis. Bratck., 2006. 160 p. (rus)
 21. Kar'kin I.N., Kontar' N.A., Grachev V.Yu. *Rekomendatsii po ispol'zovaniyu programmy FDS s primeneniem programm PyroSim2012, SmokeView i «SITIS: Flammer 3.00»* [Recommendations for using the FDS program using the PyroSim2012, SmokeView and CITIS: Flammer 3.00 software]. Ekaterinburg: Sitis, 2009. 65 p. (rus)
 22. 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-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2011. No. 2 (14). Pp. 14–18. (rus)

23. *Kategorirovanie pomeshcheniy, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoy i pozharnoy opasnosti: TKP 474-2013 (02300)* [The categorization of premises, buildings and external installations for explosion and fire hazard]. Affirmed 29.01.2013 (with cancellation in the territory of the Republic of Belarus NPB 5-2005). Minsk: MChS Respubliki Belarus', 2013. 57 p.
24. *Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroeniyakh razlichnykh klassov funktsional'noy pozharnoy opasnosti* [On the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire danger], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90833 (accessed: March 10, 2018). (rus)
25. *Ukazaniya po proektirovaniyu tsvetovoy otdelki inter'erov proizvodstvennykh zdaniy promyshlennykh predpriyatiy: SN 181-70* [Instructions on the design of the color finishing of the interiors of industrial buildings of industrial enterprises: Building codes 181-70]. Affirmed 01.10.1970. Moscow: Stroyizdat, 1972. 76 p. (rus)