

А. И. ДАНИЛОВ, аспирант кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: adanilov@Lmgt.ru)

В. А. МАСЛАК, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс" (Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, 2)

А. В. ВАГИН, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

И. А. СИВАКОВ, канд. техн. наук, ассистент кафедры физики, Университет ИТМО (Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: i_sivakov@niuitmo.ru)

УДК 614.841.48

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ВАГОНЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Представлен краткий обзор и анализ существующих подходов к моделированию горения. Предложен метод определения мощности пожара, учитывающий особенности процесса горения в ограниченном объеме вагона подвижного состава. Проведено моделирование с использованием программного средства FDS, реализующего вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. На основании результатов выполненных исследований проведено численное моделирование и получена зависимость мощности пожара от времени, которая для удобства проведения инженерных расчетов была аппроксимирована. Показано, что данная зависимость может найти применение в сфере проектирования систем обеспечения пожарной безопасности объектов метрополитена.

Ключевые слова: пожар в вагоне; тепловая мощность пожара; моделирование горения; полевая модель пожара; FDS.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35

Введение

В последние годы наблюдается рост количества проектируемых и строящихся объектов метрополитена в Москве и Санкт-Петербурге с применением новых объемно-планировочных и технологических решений. Наряду с этим ужесточаются нормативные требования к системам противодымной защиты линий и станций метрополитена, усложняется топология и алгоритмы работы систем противодымной вентиляции и противопожарной автоматики.

Практика показывает, что выполнения минимальных нормативных требований зачастую недостаточно для создания полноценно функционирующей системы противодымной защиты. Во всем мире решение таких сложных инженерных задач выполняется с использованием современных технологий компьютерного моделирования физических процессов*. В России наметилась схожая тенденция: с по-

вышением сложности применяемых систем все больше возрастает роль моделирования при выборе, обосновании и подтверждении эффективности проектных решений.

Для учета особенностей сооружений метрополитена в части объемно-планировочных решений, воздухообмена на линии в целом и на станции в частности, влияния условий внешней среды и других значимых факторов необходимо проводить моделирование развития пожара и распространения опасных факторов пожара (ОФП) с последующим инженерным анализом условий безопасной эвакуации пассажиров и персонала из подземных сооружений.

В связи с этим все более актуальной становится задача обоснованного выбора сценария и параметров проектной аварии, в частности параметров пожара в вагоне подвижного состава. В соответствии с действующими нормативными документами пожар в вагоне является основным сценарием пожара для платформенных залов станций и именно он определяет структуру и параметры систем противодымной защиты станции и линий метрополитена.

* В качестве примера можно привести общепризнанные в мире и считающиеся эталонными американские стандарты NFPA 502 "Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways" и NFPA 130 "Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems".

Обзор существующих методов моделирования горения

При моделировании пожаров используются различные математические модели и программные продукты. Наибольшую детализацию процесса и достоверность результатов позволяют получить полевые (вычислительные гидрогазодинамические) модели, в основе которых лежит решение уравнений Навье – Стокса с соответствующими замыканиями.

В среде специалистов по пожарной безопасности широкое распространение получил программный продукт Fire Dynamics Simulator (FDS) разработки NIST (National Institute of Standards and Technology, США), являющийся достаточно мощным и универсальным инструментом моделирования физических процессов при пожаре, который позволяет качественно и количественно оценить динамику развития пожара и распространения ОФП с учетом физико-химических свойств горящих веществ.

По способу задания характеристик очага пожара существует несколько принципиально разных подходов к моделированию горения с помощью программного продукта FDS.

Самый простой способ, используемый в большинстве инженерных расчетов, заключается в задании скорости распространения, площади пожара и удельного тепловыделения (HRRPUA) с поверхности горения. При задании этих параметров используют усредненные, приведенные к единице площади экспериментальные данные, полученные при сжигании нескольких видов материалов, характеризующих тот или иной тип пожарной нагрузки (например, “типовое” жилое помещение или “типовой” зал кинотеатра). При этом не учитываются процессы, происходящие внутри материала, а моделируется только газофазное горение при заданных граничных условиях.

Преимущества данного способа заключаются в простоте задания исходной модели пожара, меньшей нелинейности модели, более высокой устойчивости и сходимости решения, более низких требованиях к разрешающей способности сетки и, как следствие, более высокой скорости выполнения расчета. Основные недостатки вытекают из особенностей способа: отсутствует связь между процессами в твердой и газообразной фазах; осреднение физико-химических и тепловых параметров пожарной нагрузки не позволяет адекватно учесть динамику распространения пожара по различным составляющим пожарной нагрузки; недостаточность справочных данных зачастую не позволяет моделировать выгорание или затухание пожара. При значительном отличии условий протекания модельного пожара от эксперимента, в котором получены осредненные данные (например, при существенно ограниченном

доступе окислителя), результаты моделирования могут количественно, а иногда и качественно не совпадать с реальностью. Еще одной проблемой является то, что для ряда видов пожарной нагрузки отсутствуют экспериментальные или справочные данные, на основании которых можно было бы принимать усредненные значения параметров пожара.

При отсутствии усредненных экспериментальных данных для конкретного вида пожарной нагрузки и наличии сведений о ее отдельных компонентах задача может быть решена путем совместного моделирования газофазного горения с учетом термодинамических процессов, происходящих внутри материала. Суть подхода заключается в задании скорости выгорания твердых горючих материалов, составляющих пожарную нагрузку. При этом распространение пламени по поверхности определяется температурой воспламенения и теплофизическими свойствами материалов и газовоздушной среды, что позволяет моделировать горение без сведений об усредненных значениях параметров тепловыделения очага пожара. В данном подходе для упрощения модели допустимо приводить гетерогенную пожарную нагрузку к одному веществу по теплотворной способности, хотя при этом следует помнить, что итоговая динамика развития пожара не будет в полной мере соответствовать реальному пожару. К недостаткам подхода можно отнести невозможность прямого учета различных химических реакций для нескольких материалов. Однако выход продуктов горения от различных материалов может быть учтен путем задания химической реакции с составным горючим и составными продуктами горения, в которой стехиометрические коэффициенты подбираются с учетом массовых долей материалов в пожарной нагрузке. К существенным недостаткам метода можно отнести его большую в сравнении с заданием усредненных характеристик нелинейность, более высокие требования к разрешающей способности сетки и, как следствие, более значительную длительность расчета.

Самым детализированным и комплексным, но при этом и наиболее сложным, является подход с одновременным моделированием газофазного горения и газификации твердого материала, которая заключается в пиролизе или испарении с выделением газообразного горючего, обусловленном термическим разложением. Скорость разложения твердой фазы и образования газообразного горючего определяется химической кинетикой процесса (уравнение Аррениуса), плотностью воспринимаемого поверхностью материала теплового потока и диффузионными процессами в газовой фазе. Основное преимущество подхода — возможность моделирования процесса горения, максимально приближен-

ного к реальному, наличие обратной тепловой связи между газовой и твердой фазами. К недостаткам следует отнести необходимость знать для каждого материала наряду с теплофизическими параметрами, определяющие химическую кинетику процесса (устанавливаемые экспериментально), а также подбирать источник зажигания, обеспечивающий зажигание и самоподдерживающееся горение. Введение дополнительных параметров усложняет модель, повышает ее нелинейность, снижает устойчивость и сходимость. Кроме того, решение, как правило, не является робастным, чувствительно к выбору метода расчета турбулентности и разрешающей способности сетки. Наиболее точные результаты получаются при использовании метода прямого численного моделирования (DNS). Все вышеперечисленное делает практически невозможным применение данного подхода для решения крупномасштабных инженерных задач, таких как моделирование пожара на станции метрополитена или в тоннеле.

Необходимо отметить, что основная сложность применения моделирования в России для обоснования проектных решений связана с тем, что отсутствуют официальные методики моделирования и анализа результатов, а для ряда объектов и видов пожарной нагрузки отсутствуют официально опубликованные и научно обоснованные исходные данные для проведения расчетов. В частности, для объектов подземной транспортной инфраструктуры (метрополитены и транспортные тоннели) отсутствуют данные по пожарам в основных видах вагонов.

Если параметры химической реакции, протекающей при горении пожарной нагрузки, можно получить путем осреднения с учетом массовой доли в общей пожарной нагрузке реакций по каждому материалу, применяемому при строительстве вагонов, то при задании мощности пожара возникают проблемы. В зарубежных странах существует практика использования стандартизованных расчетных зависимостей мощности пожара от времени для основных видов вагонов метрополитена, железнодорожных вагонов и локомотивов [1, 2], включенных в общеевропейские нормативные документы [3]. Эти данные получены на основании крупномасштабных экспериментальных исследований и результатов моделирования конкретных объектов. Последние крупномасштабные экспериментальные исследования в нашей стране проводились Санкт-Петербургским филиалом ВНИИПО МЧС России в 1988–1990 годах на вагонах, уже снятых с производства [4], поэтому результаты этих исследований имеют ограниченную практическую ценность и не могут быть применены при проектировании новых объектов. В настоящее время в официальных источниках имеются данные только по пожарной нагрузке эксплуатиру-

емых вагонов и отдельные сведения по параметрам горения материалов конструкций, применяемых в современных вагонах.

Цели и задачи

Цель проведения исследований — определение параметров пожара на основании численного моделирования с использованием имеющихся данных по характеристикам материалов, применяемых при строительстве современных вагонов метрополитена, сведений по пожарной нагрузке вагонов, приведенных в официальных источниках [5, 6], и справочных данных [7–9].

Анализ данных о горючих материалах, применяемых при строительстве современных вагонов моделей 81-557 и 81-558, позволил получить максимальное значение приведенной пожарной нагрузки — $28,17 \text{ кг/м}^2$ [6]. Диаграмма распределения видов материалов, используемых в конструкциях вагона, представлена на рис. 1. Задача исследования заключалась в оценке зависимости мощности пожара от времени при условии равномерного распределения эквивалентной пожарной нагрузки по площади вагона и полного выгорания всей массы пожарной нагрузки в пределах одного вагона.

Постановка задачи и граничные условия

Низшая теплота сгорания и удельная массовая скорость выгорания принимались равными: $Q_n^p = 16,74 \text{ МДж/кг}$, $m_{\text{уд}} = 0,024 \text{ кг/(с·м}^2\text{)}$ [6, 10, 11]. Суммарная пожарная нагрузка определялась по площади вагона при плотности условной древесины 500 кг/м^3 .

Для расчетной оценки динамики развития пожара принят следующий сценарий:

- рассматривается пожар в отдельном вагоне, расположенном в замкнутом объеме, ограниченном расчетной областью (вагон остановлен на станции или в перегонном тоннеле);
- пожар в подвагонном пространстве рассматривается как источник зажигания пожарной нагрузки вагона;
- пожарная нагрузка равномерно распределена по всей площади вагона;
- двери вагона открыты с одной стороны в связи с тем, что рассматривается ситуация, когда уже начался или завершился процесс эвакуации из вагона (при остановке на станции или в перегонном тоннеле эвакуация всегда осуществляется из одной группы дверей).

Численное моделирование проводилось с использованием программного средства FDS, реализующего вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении, основанную на численном решении уравнений Навье – Стокса.

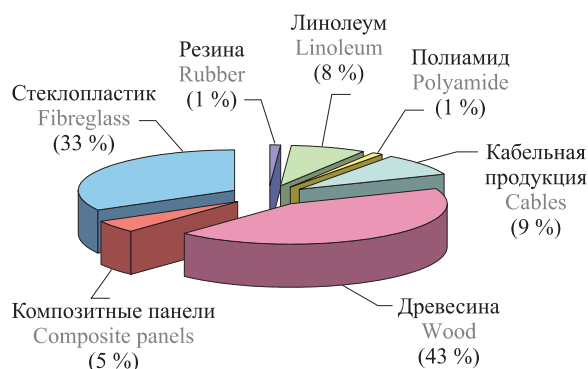


Рис. 1. Виды материалов в конструкции вагона метрополитена

Fig. 1. Types of materials in the construction of the subway car

В расчете учитывались все геометрические характеристики вагона.

При проведении расчетов принимались следующие начальные условия:

- начальная температура среды — 20 °С;
- источник воспламенения активируется в момент времени $t = 0$ с;
- мощность источника воспламенения составляет 1000 кВт/м²;
- длительность воздействия источника воспламенения — 60 с;
- двери вагона открыты с одной стороны;
- целостность остекления окон и закрытых дверей вагона в начальный момент времени сохраняется.

Граничными являлись следующие условия:

- материал ограждающих конструкций вагона — металл;
- вскрытие окон вагона происходит при температуре среды в зоне остекления более 300 °С;
- вагон расположен в объеме, ограниченном сетками, размером 40×12×6 м;
- нижняя и боковые поверхности объема ограничены сетками;
- верхняя горизонтальная поверхность объема — поверхность "Open".

Расчетная область составляла 40×12×6 м. Размер ячеек сеток в зоне поверхности горения — 0,025×0,025×0,025 м, а в зоне над очагом пожара и за пределами вагона — 0,25×0,25×0,25 м. Время расчета принималось с учетом полного выгорания пожарной нагрузки и составляло 2500 с.

Результаты расчета

Общее время проведения расчета на кластере с использованием 48 вычислительных потоков составило 396 ч. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 2.

Зависимость мощности пожара от времени и вид расчетной модели в различные моменты времени

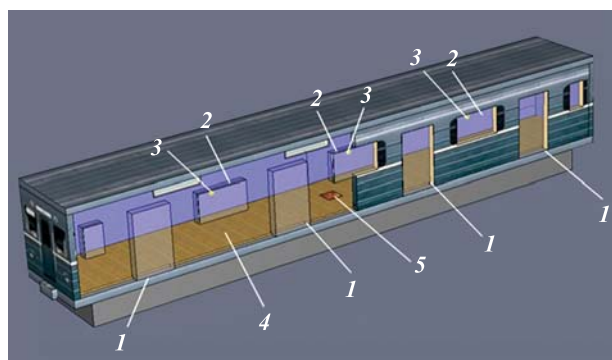


Рис. 2. Общий вид расчетной модели: 1 — двери вагона (4 двери открыты в начальный момент времени); 2 — окна вагона (в начальный момент времени все окна закрыты); 3 — датчики температуры (окна вагона вскрываются при достижении температуры на датчиках 300 °С); 4 — распределенная пожарная нагрузка; 5 — источник воспламенения

Fig. 2. Computational model view: 1 — car doors (4 doors are opened in a initial time); 2 — car windows (in a initial moment all windows are closed); 3 — temperature sensors (windows of the car are opened at achievement of temperature on sensors of 300 °C); 4 — distributed fire load; 5 — ignition source

представлены на рис. 3 и 4. Максимальная мощность пожара достигается на 1415-й секунде (23,6-й минуте) и составляет 12,3 МВт. При этом в центральной зоне вагона часть пожарной нагрузки выгорает, площадь поверхности горения максимальна для заданных условий. Вскрытие окон вагона происходит в диапазоне времени 250...280 с для окон, находящихся в непосредственной близости от источника воспламенения, и 750...790 с — для окон, расположенных в торцах вагона. Поля температур в продольном сечении вагона приведены на рис. 5. При пиковом значении мощности пожара локальные значения температуры достигают 700 °С. Средняя температура в зоне под потолком вагона находится в диапазоне 300...350 °С.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами зарубежных исследований, в соответствии с которыми мощность пожара в ваго-

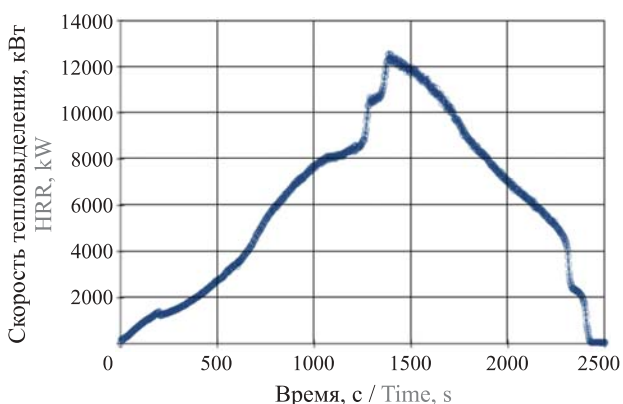
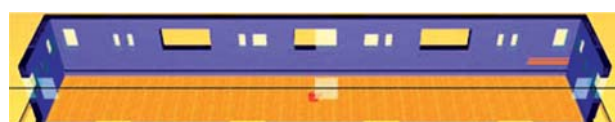


Рис. 3. Зависимость мощности пожара от времени
Fig. 3. Dependence of heat release rate of the fire on time



$t = 0$, HRR = 0



$t = 300$ с, HRR = 1,5 МВт
 $t = 300$ s, HRR = 1.5 MW



$t = 900$ с, HRR = 8,4 МВт
 $t = 900$ s, HRR = 8.4 MW



$t = 1400$ с, HRR = 12,3 МВт
 $t = 1400$ s, HRR = 12.3 MW



$t = 2200$ с, HRR = 5,8 МВт
 $t = 2200$ s, HRR = 5.8 MW

Рис. 4. Динамика развития пожара в вагоне подвижного состава метрополитена

Fig. 4. Fire development dynamics in the subway rolling stock car

не метро находится в пределах 10...15 МВт при времени достижения пиковой мощности 25...35 мин [12–14, 3].

Для сокращения времени расчета в реальных условиях проектирования систем противопожарной защиты метрополитена приведенная на рис. 3 кривая мощности пожара была аппроксимирована зависимостью, представленной на рис. 6.

Исходные данные для расчета в FDS задаются следующими параметрами:

- максимальная площадь очага пожара $F_{\text{п}} = 37 \text{ м}^2$;
- линейная скорость распространения пожара $v_{\text{л}} = 0,02 \text{ м/с}$;
- тепловыделение $\text{HRRPUA} = 380 \text{ кВт/м}^2$.

Зависимость коэффициента тепловыделения от времени (Ramp-UpTime в свойствах параметра “Поверхность”) приведена в таблице.

Параметры химической реакции при проведении расчетов динамики развития пожара в вагоне определяются на основании анализа количественного и качественного состава материалов, исполь-



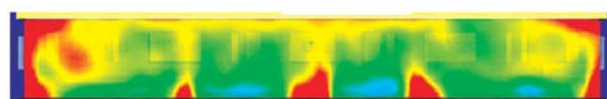
$t = 0$



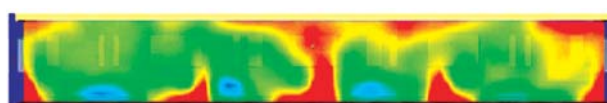
$t = 300$ с / $t = 300$ s



$t = 600$ с / $t = 600$ s

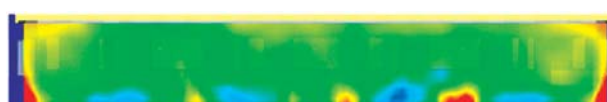


$t = 1200$ с / $t = 1200$ s



$t = 1415$ с / $t = 1415$ s

Максимальная скорость тепловыделения / HRR_{max}



$t = 1800$ с / $t = 1800$ s

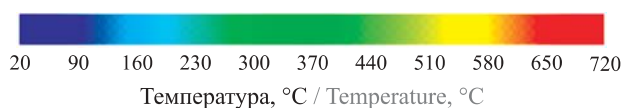


Рис. 5. Поля температур в продольном сечении вагона

Fig. 5. Fields of temperatures in a longitudinal section of the car

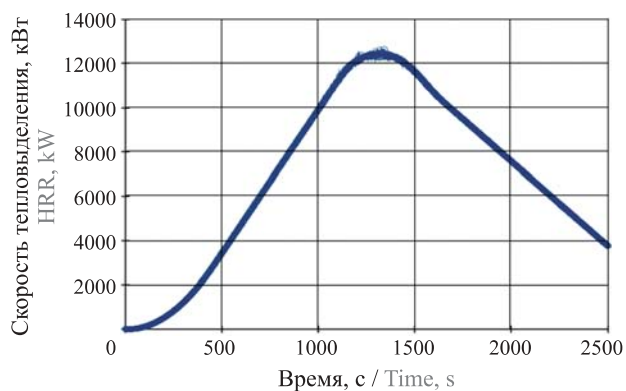


Рис. 6. Зависимость мощности пожара от времени

Fig. 6. Dependence of heat release rate of the fire on time

зуемых при изготовлении вагона. Диаграмма, отражающая процентное соотношение основных горючих материалов вагона, приведена на рис. 1. Средне-

Зависимость коэффициента тепловыделения от времени
Dependence of heat release parameter on time

Время, с Time, s	Коэффициент теповыделения Heat release parameter	Время, с Time, s	Коэффициент теповыделения Heat release parameter
0,0	0,0	1320,0	0,780864
60,0	0,055554	1427,0	0,7225704
120,0	0,111108	1520,0	0,671904
240,0	0,222216	1640,0	0,606528
360,0	0,333324	1760,0	0,541152
480,0	0,444432	1880,0	0,475776
600,0	0,55554	2000,0	0,4104
720,0	0,666648	2120,0	0,345024
840,0	0,777756	2240,0	0,279648
960,0	0,888864	2360,0	0,214272
1080,0	0,999972	2500,0	0,138
1200,0	0,84624		

взвешенные значения параметров определялись в соответствии с зависимостью

$$L_i^s = \frac{1}{\sum m_i} \sum L_i^j m_i,$$

где L_i^s — средневзвешенное значение i -го параметра суммарной пожарной нагрузки;

L_i^j — значение i -го параметра для j -го компонента пожарной нагрузки;

m_i — массовая доля i -го материала в пожарной нагрузке;

$L_{O_2}^s$ — удельный расход кислорода;

$L_{O_2}^s = 2,569$ кг/кг;

L_{CO}^s — удельный выход CO; $L_{CO}^s = 0,11$ кг/кг;

$L_{CO_2}^s$ — удельный выход CO₂; $L_{CO_2}^s = 0,574$ кг/кг;

L_{HCl}^s — удельный выход HCl;

$L_{HCl}^s = 0,00495$ кг/кг.

Средневзвешенный выход частиц углерода L_C^s определяется исходя из средневзвешенной дымообразующей способности материала:

$$L_C^s = D_m^s / K_m,$$

где D_m^s — средневзвешенная дымообразующая способность; $D_m^s = 250$ Нп·м²/кг;

K_m — коэффициент светового поглощения;

$K_m = 8700$ м²/кг.

В последующих формулах для упрощения записи верхний индекс s , обозначающий средневзвешенное значение величины, не указан.

Для газа α справедливо следующее выражение:

$$L_\alpha = \frac{v_\alpha M_f}{M_\alpha} \rightarrow v_\alpha = \frac{L_\alpha M_f}{M_\alpha},$$

где M_α — молярная масса отдельных компонентов пожарной нагрузки, г/моль;

M_f — молярная масса суммарной пожарной нагрузки.

Соответственно, для каждого газа получим:

$$v_{O_2} = \frac{L_{O_2} M_f}{M_{O_2}}; \quad v_{CO_2} = \frac{L_{CO_2} M_f}{M_{CO_2}};$$

$$v_{CO} = \frac{L_{CO} M_f}{M_{CO}}; \quad v_C = \frac{L_C M_f}{M_C} = \frac{D_m M_f}{K_m M_C};$$

$$v_{HCl} = \frac{L_{HCl} M_f}{M_{HCl}}.$$

Из закона сохранения массы находим:

$$L_{H_2O} = 1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C - L_{HCl};$$

$$v_{H_2O} = \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C - L_{HCl}) M_f}{M_{H_2O}}.$$

В соответствии с рекомендациями [5] для расчета используются молярные массы условных “базовых” веществ, характерные для данного вида топлив.

Для большинства материалов используется два вида “базовых” веществ:

- дерево (C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}, $M_f = 87$ г/моль) — для материалов на основе дерева, целлюлозы, тканей;
- стирол (C₆H₅—CH=CH₂, $M_f = 104$ г/моль) — для материалов с содержанием пластмасс, резины и других искусственных материалов.

Для расчета принимается второй вариант.

Вывод

На основании результатов численного моделирования получена зависимость мощности пожара от времени, основанная на данных по реальным параметрам пожарной нагрузки вагонов, эксплуатируемых в настоящее время. Полученная зависимость была аппроксимирована с учетом возможности дальнейшего использования ее при моделировании динамики развития ОФП с помощью программного средства FDS в условиях ограниченных сроков проектирования. Практический результат проведенных исследований заключается в том, что проектировщику предоставляются обоснованные исходные данные для моделирования процесса развития ОФП на объектах метрополитена, результаты которого являются основой для создания системы противопожарной защиты.

Правомерность подхода к решению поставленной задачи и результатов, полученных в ходе выполнения работы, подтверждается данными отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения пожарной безопасности объектов метрополитена [1–4, 11–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ergebnisbericht zur beurteilung von branden an schienenfahrzeugen als bemessungsbrände zur brand-schutztechnischen auslegung von oberirdischen personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG. — Frankfurt am Main : Deutsche Bahn AG, DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz, September 2000.
2. Bemessungsbrände für s-bahnen und den gemischten reisezugverkehr : anwenderhandbuch. — Köln : STUVA, Juni 2010 [Design fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport : manual. — Cologne : STUVA, June 2010].
3. Fire in Tunnels. Technical Report — Part 1. Design Fire Scenarios. — Brussels, Belgium, WTCB, 2006. — 161 p.
4. Провести исследования и определить требуемые пределы огнестойкости несущих конструкций станций и тоннелей на основании реального температурного режима : отчет о НИР (заключ.) / ЛФ ВНИИПО; руководитель В. П. Беляцкий. — П.Л2.Н.003.89 (разд. 4). — Л., 1990. — 87 с.
5. Оценка соответствия вагонов метрополитена моделей 81-556, 81-557 и 81-558 требованиям НПБ 109-96 “Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности” : заключение № 014-03.13. — СПб. : Санкт-Петербургский филиал ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2013. — 38 с.
6. Пособие по применению “Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ВНИИПО, 2014. — 226 с.
7. *Корольченко А. Я., Корольченко Д. А.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. 1, 713 с.; Ч. 2, 774 с.
8. Программный комплекс Fire Cat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. — Екатеринбург : ИП Карькин И. Н., 2014. — 27 с.
9. *Бондарев В. Ф., Лесков А. А.* Определение интенсивности тепловыделения при пожаре подвижного состава метрополитена в тоннеле // Борьба с пожарами в метрополитенах : сб. науч. тр. — М. : ВНИИПО МВД РФ, 1992. — С. 62–70.
10. Surface transport master plan. Addendum 3 — Transit corridor safeguarding. Fire and life safety concept. — Abu Dhabi, UAE : Department of Transport, November 2008. URL: <https://www.scribd.com/document/320813316/Fire-and-Life-Safety-Concept> (дата обращения: 01.08.2017).
11. *Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M.* Heat release rate measurements in tunnel fires. SP Report 1994:08. — Borås : Swedish National Testing and Research Institute, 1994. — 64 p.
12. *Haack A.* Real fires and design fires // Proceedings of the Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles. — Barcelona, Spain, 5 May 2011.
13. *Bo Si Zhang, Shou Xiang Lu.* Numerical simulation and analysis of compartment fire in subway train // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 166-169. — P. 2726–2730. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.2726.
14. *Li Y. Z., Ingason H.* A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method // Fire Technology. — 2016. — Vol. 52, Issue 5. — P. 1449–1464. DOI: 10.1007/s10694-015-0464-3.

Материал поступил в редакцию 15 августа 2017 г.

Для цитирования: Данилов А. И., Маслак В. А., Вагин А. В., Сиваков И. А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 27–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35.

English

NUMERICAL SIMULATION OF A SUBWAY CAR FIRE

DANILOV A. I., Postgraduate Student, Department of Buildings Fire Safety and Automated Extinguishing Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: adanilov@lmgmt.ru)

MASLAK V. A., Candidate of Technical Sciences, General Director of OJSC "Scientific-and-Research Design-and-Survey Institute "Lenmetrogioprotrans" (Bolshaya Moskovskaya St., 2, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation)

VAGIN A. V., Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Department of Buildings Fire Safety and Automated Extinguishing Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

SIVAKOV I. A., Candidate of Technical Sciences, Assistant of Physics Department, ITMO University (Kronverkskiy Avenue, 49, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; e-mail: i_sivakov@niuitmo.ru)

ABSTRACT

This research thesis presents the simulation of fire growth and flame spread within a car in an underground trainway using Fire Dynamics Simulator (FDS) realizing Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The motivation of the study is to predict the heat release rate (HRR) and specifically the peak value for emergency situations. The existing documents don't contain recommendations for defining these important parameters. Using of several methods of estimating the HRR for a metro train, it appears that the current methods cannot realistically predict the HRR because factors such as the burning behavior of materials; and the train and tunnel geometries that affect the HRR are not considered. This project attempts to incorporate these factors in the FDS model.

Modeling was realized on the base of such main research results as:

- fire load of subway car series 81-557 and 81-558 (wood equivalent);
- burning rate (full scale experiments).

A number of assumptions have been made so that to simplify the model. They were:

- passenger doors were opened from one side of car;
- fire load was spread on car area;
- window failure was simulated, at temperature 300 °C window began to fracture and fall off (temperature was controlled by detectors at center of windows);
- ignition of material was initiated by point source;
- upper plane of the computational domain is defined as "Open";
- calculation was carried out until the fire load was completely burned out.

The size of the computational domain was 40 m long by 12 m wide by 6 m high. Two grid sizes, 0.025×0.025×0.025 m (zone of fire load) and 0.25×0.25×0.25 m (zone above fire load) were used.

The simulation time specified for simulation was 2500 s.

Results of modeling:

- HRR-curve: approximation of HRR-curve for engineering calculations ("design fire");
- value of peak HRR — 12.3 MW;
- combustion reaction parameters.

The results of the study and the obtained dependence of the heat release rate can be applied in the development, justification of parameters, evaluation of the smoke protection systems efficiency and analysis of people safe evacuation conditions in case of fire.

Keywords: car fire; heat release rate; fire simulation; fire field model; fire dynamics simulator (FDS).

REFERENCES

1. *Ergebnisbericht zur beurteilung von branden an schienenfahrzeugen als bemessungsbrände zur brandschutztechnischen auslegung von oberirdischen personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG.* Frankfurt am Main, Deutsche Bahn AG, DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz, September 2000.
2. *Bemessungsbrände für s-bahnen und den gemischten reisezugverkehr. Anwenderhandbuch.* Köln, STUVA, Juni 2010 [Design fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport. Manual. Cologne, STUVA Publ., June 2010].

3. *Fire in Tunnels. Technical Report — Part 1. Design Fire Scenarios*. Brussels, Belgium, WTCB, 2006. 161 p.
4. *Researching and determination of required fire resistance limits for load-carrying structures of stations and tunnels based on the actual temperature regime*. Report on research work (final). Saint Petersburg, 1990. 87 p. (in Russian).
5. *The conformity assessment of subway cars of models 81-556, 81-557 and 81-558 to the requirements of NPB 109–96 “Underground vans. Fire safety requirements”*. The conclusion No. 014-03.13. Saint Petersburg, Saint Petersburg Branch of All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2013. 38 p. (in Russian).
6. *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”*. 2nd edition. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2014. 226 p. (in Russian).
7. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, part 1, 713 p.; part 2, 774 p. (in Russian).
8. *Fire Cat software. The library of reactions and combustion surfaces in PyroSim*. Yekaterinburg, IP Karkin I. N. Publ., 2014. 27 p. (in Russian).
9. Bondarev V. F., Leskov A. A. Determination of heat release in the fire of the subway rolling stock in the tunnel. In: *Borba s pozharemi v metropolitenakh: sb. nauch. tr.* [Fire safety in subways. Collected papers]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1992, pp. 62–70 (in Russian).
10. Surface transport master plan. Addendum 3 — Transit corridor safeguarding. Fire and life safety concept. Abu Dhabi, UAE, Department of transport, November 2008. Available at: <https://www.scribd.com/document/320813316/Fire-and-Life-Safety-Concept> (Accessed 1 August 2017).
11. Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M.. *Heat release rate measurements in tunnel fires. SP Report 1994:08*. Borås, Swedish National Testing and Research Institute, 1994. 64 p.
12. Haack A. Real fires and design fires. In: *Proceedings of the Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles*. Barcelona, Spain, 5 May 2011.
13. Bo Si Zhang, Shou Xiang Lu. Numerical simulation and analysis of compartment fire in subway train. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 166-169, pp. 2726–2730. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.2726.
14. Li Y. Z., Ingason H. A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, issue 5, pp. 1449–1464. DOI: 10.1007/s10694-015-0464-3.

For citation: Danilov A. I., Maslak V. A., Vagin A. V., Sivakov I. A. Numerical simulation of a subway car fire. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 27–35 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35.