



УДК 614.841, 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТОННЕЛЕ

А.И. Данилов^{a,b}, И.А. Сиваков^{b,c}, Н.В. Пилипенко^c, А.В. Петров^c, П.А. Костерева^c

^a Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

^b ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, 191002, Российская Федерация

^c Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Pilipenko38@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 09.01.17, принята к печати 01.03.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Данилов А.И., Сиваков И.А., Пилипенко Н.В., Петров А.В., Костерева П.А. Моделирование пожара пассажирского поезда в железнодорожном тоннеле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 340–347. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

Аннотация

Аналитическими и численными методами выполнено моделирование динамики развития пожара и распространения опасных факторов пожара для аварийных ситуаций, связанных с пожаром пассажирского поезда, с учетом специфики используемых на российских железных дорогах подвижных составов. Рассмотрены конструктивные особенности некоторых типов вагонов и локомотивов, применяемых на железной дороге, процессы возникновения и развития пожара на них, влияние опасных факторов пожара на безопасность людей в тоннеле. Для моделирования развития пожара в тоннеле и определения динамики распространения пожара использована полевая математическая модель, основанная на решении системы уравнений Навье–Стокса для многокомпонентного неизоэтермического течения в существенно дозвуковом приближении, реализованная в программе FDS. Приведены результаты моделирования для различных сценариев пожара, выполнены расчеты тепловой мощности пожара с учетом свойств горящих материалов и конструктивных особенностей подвижного состава, выполнена оценка обеспечения безопасности людей при пожаре. Результаты работы применены при разработке проектной документации на железнодорожные тоннели в ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс».

Ключевые слова

пожар, железнодорожный тоннель, противопожарная защита, опасные факторы пожара, пожарная нагрузка, мощность пожара, полевая модель пожара, модель крупных вихрей, FDS

NUMERICAL SIMULATION OF PASSENGER TRAIN FIRE IN RAILWAY TUNNEL

A.I. Danilov^{a,b}, I.A. Sivakov^{b,c}, N.V. Pilipenko^c, A.V. Petrov^c, P.A. Kostereva^c

^a Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

^b JSCS&R Design and Survey Institute "Lenmetrogiprotrans", Saint Petersburg, 191002, Russian Federation

^c ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Pilipenko38@mail.ru

Article info

Received 09.01.17, accepted 01.03.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

Article in Russian

For citation: Danilov A.I., Sivakov I.A., Pilipenko N.V., Petrov A.V., Kostereva P.A. Numerical simulation of passenger train fire in railway tunnel. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 340–347 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-340-347

Abstract

The paper presents analytical calculation and numerical simulation of fire, smoke and toxic gases spreading in the case of railways passenger train fire in a tunnel in view of the design features of certain types of Russian railway passenger cars and locomotives, the stages of the fire growth and the influence of various conditions on people safety in the tunnel. For a passenger train fire simulation we have used computational fluid dynamics model of fire-driven fluid flow based on solving a large-eddy simulation form of the Navier–Stokes equations appropriate for low-speed, thermally-driven flow with an

emphasis on smoke and heat transport from fires, realized in the FDS program. The simulation results of various fire scenarios are given. The calculation of fire heat power was performed with consideration for the properties of the flammable materials and design features of train cars and locomotives. The assessment of the provisioned people's safety was carried out. The results were applied in the design of railway tunnels in JSCS&R Design and Survey Institute "Lenmetrogiprotrans".

Keywords

fire, railway tunnel, fire protection, fire hazard, fire load, fire power, Computational Fluid Dynamics (CFD), Large Eddy Simulation (LES), FDS

Введение

Проблема обеспечения безопасности при пожарах в железнодорожных тоннелях приобретает все большую значимость. Это обусловлено ростом пассажиро- и грузоперевозок, масштабами последствий при отсутствии необходимого уровня противопожарной защиты и переходе пожара в развитую стадию. Трудности проведения работ по локализации и ликвидации пожара, а также спасению большого количества людей, которые могут одновременно пребывать внутри тоннеля, могут привести к катастрофическим последствиям, сопровождаться массовой гибелью людей и большими материальными потерями.

Снижение потерь и затрат при пожарах требует тщательно разработанных организационных, технических и профилактических решений. Для этого необходима информация о том, как развивается и распространяется пожар, а также как опасные факторы пожара (ОФП) воздействуют на людей, оборудование и конструкции тоннеля. Для решения этой задачи во всем мире принято выполнять анализ динамики развития пожара и распространения ОФП с применением современных технологий компьютерного моделирования¹.

При этом нужно учитывать специфику объекта: для железнодорожных тоннелей важно отличать пожары в пассажирских поездах от пожаров в товарных поездах. Пассажирские поезда не перевозят других грузов, кроме багажа и почты. Товарные поезда могут перевозить значительные количества грузов, включая опасные грузы, но из людей в них только бригада машинистов, иногда еще несколько человек. Только в двухпутных тоннелях и в длинных тоннелях есть возможность нахождения более одного поезда в тоннеле в одно и то же время. В случае аварии неповрежденный поезд в большинстве случаев имеет возможность выехать из тоннеля.

Список крупных железнодорожных аварий, повлекших за собой значительные материальные потери или гибель людей, за период 1990–2016 гг. включает в себя приблизительно 125 крупных железнодорожных аварий по всему миру. Большая часть аварий сопровождалась сходом с рельс и (или) столкновениями [1–4]. За рассмотренный период в мире пожары с катастрофическими последствиями в железнодорожных тоннелях происходили достаточно редко, с периодичностью 1 пожар в 5 лет. Большинство возникающих пожаров является следствием причин, практически не поддающихся профилактике со стороны обслуживающего персонала, и связаны с горением пожарной нагрузки и источниками зажигания, вносимыми в тоннель подвижным составом [1, 5–7]. Особо стоит отметить пожар в тоннеле Китцштайнхорн (г. Капрун, Австрия) 11 ноября 2000 года, когда полностью сгорел поезд, а от удушья погибло 155 пассажиров [8, 9].

Джонатан Барнетт [10] пришел к выводу, что определение оптимальных проектных аварийных ситуаций имеет решающее значение для эффективного проектирования системы противопожарной безопасности и позволяет минимизировать негативные последствия от их наступления.

В России на сегодняшний день развитие нормативной и методической базы не успевает за потребностями проектно-строительной области. Так, например, проектирование систем противодымной вентиляции требует знания тепловой мощности пожара и расхода продуктов горения. В большинстве развитых стран, активно использующих тоннели, регулярно проводятся научно-исследовательские работы по противопожарной тематике и комплексные огневые испытания по определению различных параметров пожаров в тоннелях [11], что позволяет учитывать при проектировании специфику применяемых на железной дороге подвижных составов и видов перевозимых грузов. В России в течение последних 20–30 лет работы подобного характера практически не проводились, поэтому для тоннельных сооружений эти величины не нормированы, отсутствуют методики их расчета, отсутствуют в открытом доступе экспериментальные базы по результатам сжигания различных видов вагонов и локомотивов с оценкой их противопожарных характеристик и физико-химических свойств материалов, из которых они изготовлены, отсутствуют статистические базы по пожарам, их последствиям, особенностям ликвидации и т.д.

В связи с этим в настоящей работе приведены результаты и анализ моделирования динамики развития пожара и распространения ОФП для двух аварийных ситуаций, связанных с пожаром пассажирского поезда, с учетом специфики используемых на российских железных дорогах подвижных составов.

¹ 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»

Математическая модель возникновения и развития пожара

Для описания турбулентного течения реагирующей смеси использовались уравнения сохранения массы, импульса и энергии, формирующие систему уравнений Навье–Стокса для многокомпонентного неизоэнтальпического течения (существенно дозвуковое приближение) [12]:

– уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j}{\partial x_j} = 0;$$

– уравнения движения

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \bar{m}_{b,i}'';$$

– уравнения баланса массы компонентов смеси

$$\frac{\partial \bar{\rho} Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \bar{Y}_\alpha}{\partial x_j} + \bar{R}_\alpha;$$

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial \bar{\rho} h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j h}{\partial x_j} = -\frac{\partial P_0}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_{rj}}{\partial x_j} + \bar{q}''.$$

Для замыкания данной системы уравнений используются уравнение состояния идеального газа,

$$P_0 = R \bar{\rho} T \sum_{\alpha \neq C} \frac{\bar{Y}_\alpha}{M_\alpha},$$

и уравнение для энтальпии единицы массы, выраженной через массовые доли компонентов \bar{Y}_α и энтальпию каждого из компонентов:

$$\bar{h}(Y_i, T) = \sum_i \bar{Y}_i \left(h_{f,i}^0 + \int_{T^0}^T C_{p,i}(T) dT \right).$$

В данной системе уравнений используются следующие обозначения: ρ – плотность, u_j – компоненты скорости, Y_α – массовая доля компонента, Sc – число Шмидта, \bar{R}_α – средняя скорость химической реакции, μ – динамическая вязкость, μ_t – подсеточная турбулентная вязкость, p – давление, τ_{ij} – тензор напряжений, g – ускорение свободного падения, $\bar{f}_{d,i}$ – сила сопротивления неразрешенных лагранжевых частиц, $\bar{m}_{b,i}''$ – источник член, учитывающий эффекты пиролиза или испарения, h – энтальпия единицы массы, \bar{q}'' – тепловыделение в ходе химической реакции на единицу объема, $\frac{\partial \bar{q}_{rj}}{\partial x_j}$ – радиационный перенос, R – газовая постоянная, T – температура, M_α – масса компонента, $h_{f,i}^0$ – энтальпия каждого из компонентов, $C_{p,i}$ – теплоемкость при постоянном давлении каждого из компонентов; прямая линия означает осреднение (фильтрация).

Основные уравнения модели дополняются также моделью турбулентности (модель крупных вихрей с подмоделью Дж. Дидорфа для расчета подсеточной турбулентной вязкости), моделью горения на основе модели константы смешения для расчета средней скорости химической реакции \bar{R}_α , лучистого теплопереноса и теплопереноса в твердых телах, моделью движения частиц для расчета взаимодействия частиц сажистого аэрозоля и их осаждения на конструкциях.

На основе приведенной математической модели, реализованной в программном комплексе, было проведено моделирование различных аварийных ситуаций в тоннелях.

Тепловая мощность пожара для различных аварийных ситуаций

Для определения мощности необходимо знать количество, низшую теплоту сгорания и скорость выгорания материалов, задействованных в каждой из ситуаций.

На основе обобщения и анализа технических заданий и исходных данных по ряду объектов проектирования ОАО «Научно-исследовательского проектно-изыскательского института «Ленметрогипротранс», а также конструкторской документации на некоторые виды вагонов и локомотивов были определены характеристики пожарной нагрузки материалов пассажирского вагона и тепловоза 2ТЭ10МК (табл. 1 и 2). Данные по приведенной пожарной нагрузке и расчетной пиковой мощности пожара в дальнейшем используются в качестве одного из основных параметров при моделировании пожара. Вид и масса материала определялись по проектной и конструкторской документации, физико-химические свойства и низшая теплота сгорания материала – по данным [13].

Расчет пиковой тепловой мощности пожара проводился на основании методики МЧС¹ и рекомендаций ВНИИПО² по формуле

$$Q_n = \eta \cdot Q_n^p \cdot \psi \cdot F,$$

где η – коэффициент полноты сгорания; Q_n^p – низшая теплота сгорания пожарной нагрузки, МДж·кг⁻¹; ψ – массовая скорость выгорания, кг·м⁻²·с⁻¹; F – площадь очага пожара, м².

Коэффициент полноты сгорания принимался равным 0,9 (максимальное значение для пожара, регулируемого нагрузкой, в соответствии с рекомендациями ВНИИПО).

Низшая теплота сгорания и скорость выгорания принимались как средневзвешенные значения для всех материалов, составляющих пожарную нагрузку³:

$$Q_n^p = \sum_{i=1}^N Q_{ni}^p \cdot m_i / M,$$

$$\psi = \sum_{i=1}^N \psi_i \cdot m_i / M,$$

где Q_{ni}^p – низшая теплота сгорания i -го материала, МДж·кг⁻¹; ψ_i – массовая скорость выгорания i -го материала, кг·м⁻²·с⁻¹; m_i – масса i -го материала, кг; M – суммарная величина пожарной нагрузки, кг.

Наименование материала	Масса материала m_i , кг	Низшая теплота сгорания Q_{ni}^p , МДж·кг ⁻¹ [13]	Приведенная пожарная нагрузка g_i , кг·м ⁻²
Пластик бумажнослоистый декоративный	361,2	18,00	6,73
Винилискожа	182,6	18,51	3,50
Пленка полиэтиленовая	362,7	47,10	17,68
Пленка полиамидная	321	31,00	10,30
Пленка поливинилхлоридная	396,2	34,25	14,05
Плита столярная	695,2	20,00	14,39
Плита фанерная	1125,6	22,00	25,63
Плита древесно-волоконная	869,4	20,90	18,81
Фанера	581,2	16,24	9,77
Линолеум алкидный	624,1	27,10	17,51
Линолеум «Карбоксиллин»	423,6	24,30	10,66
Резиновые уплотнители	392,4	36,00	14,62
Текстиль	218,6	18,84	4,26
Деревянные бруски, пропитанные антипиреном	272,4	12,30	3,47
Стеклопластик	123,5	18,80	2,40
Ковровое покрытие	276,3	19,60	5,61
Суммарная приведенная пожарная нагрузка G , кг·м ⁻²			179,40
Средневзвешенная низшая теплота сгорания Q_n^p , МДж·кг ⁻¹			25,28
Средневзвешенное значение скорости выгорания, ψ , кг·м ⁻² ·с ⁻¹			0,027

Таблица 1. Масса и низшая теплота сгорания, расчетная масса приведенной пожарной нагрузки материалов, применяемых в конструкции пассажирских вагонов

При площади пассажирского вагона 70 м² и распространении пожара по всей площади расчетное пиковое значение тепловой мощности пожара составляет 42,2 МВт.

Тепловая мощность пожара при горении материалов отделки тепловоза и кабельной продукции составляет 8,94 МВт. Дополнительно учитывалась возможность аварийного разлива дизельного топлива и его возгорания на площади, равной площади поддона под моторной секцией дизель-генератора. Тепловая мощность пожара при горении дизельного топлива при площади разлива 3,64 м² составляет 6,24 МВт. Мощность пожара при пожаре одной секции тепловоза составляет 15,18 МВт.

¹ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382.

² Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий: Метод. рекомендации к СП 7.13130.2013. М.: ВНИИПО, 2013. 58 с.

³ СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

Наименование материала	Масса материала m_i , кг	Низшая теплота сгорания $Q_{ни}^p$, МДж·кг ⁻¹ [13]	Приведенная пожарная нагрузка g_i , кг·м ⁻²
БВПЛ ТУ 16-505.911-76	112	0,92	0,19
ТРАНСКАБ-ППСТВМнг(А) ТУ 16.К71-291-99	78	1,06	0,15
Фанера 20 мм	399,1	18,2	13,53
Мастика битумная противощумная 579	33,2	39	2,42
Линолеум трудногорючий ТУ 5771-019-002823203-98	17,12	12	0,38
Суммарная приведенная пожарная нагрузка G , кг·м ⁻²			15,06
Тепловая мощность пожара $Q_{пм}$, МВт			8,94

Таблица 2. Масса и низшая теплота сгорания, расчетная масса приведенной пожарной нагрузки материалов, применяемых в конструкции тепловоза 2ТЭ10МК (для одной секции)

Моделирование пожара поезда в тоннеле

В расчете принимались допущения, что пожар начинается в центре нагрузки и распространяется радиально с постоянной скоростью, материал ограждающих конструкций тоннеля – бетон, материалы вагонов и локомотива – в соответствии с табл. 1 и 2. Температура воздуха в расчетном домене принималась равной 25 °С. Теплообмен с грунтовым массивом не моделировался, так как за время моделирования выполняется условие полупространства со стороны грунта. Работа систем аварийной вентиляции не учитывалась, поезд при пожаре остановлен.

При моделировании химической реакции принималось допущение, что при пожаре одновременно протекают химические реакции горения всех материалов, а их вклад в общий выход продуктов горения определяется массовой долей материалов конструкции вагона и стехиометрическими коэффициентами в реакциях.

Расчетная модель представляет собой двупутный тоннель прямоугольного сечения длиной 1,5 км, шириной 12,5 м и высотой 6,75 м, на одном из путей которого расположен поезд, геометрические параметры которого приняты по проектной документации на отдельные виды локомотивов и вагонов. В зависимости от сценария пожара источник возгорания находился в локомотиве, либо в середине состава в плацкартном вагоне. В качестве примера на рис. 1 приведена расчетная модель пожара локомотива.

В результате моделирования определялась динамика развития пожара и распространения ОФП по тоннелю. В соответствии с методикой МЧС установлены критические значения по каждому из опасных факторов: по повышенной температуре – более 70 °С; по тепловому потоку – более 1400 Вт/м²; по потере видимости – менее 20 м; по пониженному содержанию кислорода – менее 0,226 кг·м⁻³; по каждому из токсичных газообразных продуктов горения (СО₂ – более 0,11 кг·м⁻³, СО – более 1,16·10⁻³ кг·м⁻³, HCL – более 23·10⁻⁶ кг·м⁻³).

Критическая продолжительность пожара по каждому из опасных факторов определялась как время достижения этим фактором критического значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола.

На рис. 2 и 3 показано изменение во времени при пожаре видимости в тоннеле (аналогичные поля получены для остальных видов ОФП).

По аналогии с приведенным выше было проведено моделирование, и получены похожие по характеру результаты для различных вариаций этих аварийных ситуаций: пожар в центре тоннеля и в припортальной зоне, пожар на участке с плановой кривой и на уклоне, а также при различных температурах воздуха в расчетном домене.

Результаты моделирования показывают, что пожар пассажирского поезда в тоннеле имеет высокую динамику развития и распространения ОФП по тоннелю. Более быстрое блокирование путей эвакуации в случае пожара двухсекционного локомотива во всех промоделированных сценариях объясняется меньшей мощностью пожара, из-за чего раньше нарушается стратификация дымового слоя и холодного воздуха, происходит их перемешивание и опускание продуктов горения вниз.

В подобных условиях крайней важным для обеспечения возможности спасения людей и проведения мероприятий по локализации и тушению становится оптимальная работа системы дымоудаления (или аварийной вентиляции), что недостижимо без многовариантного проектирования и использования компьютерного моделирования аварийных ситуаций для подбора оптимальных параметров работы в разных режимах.

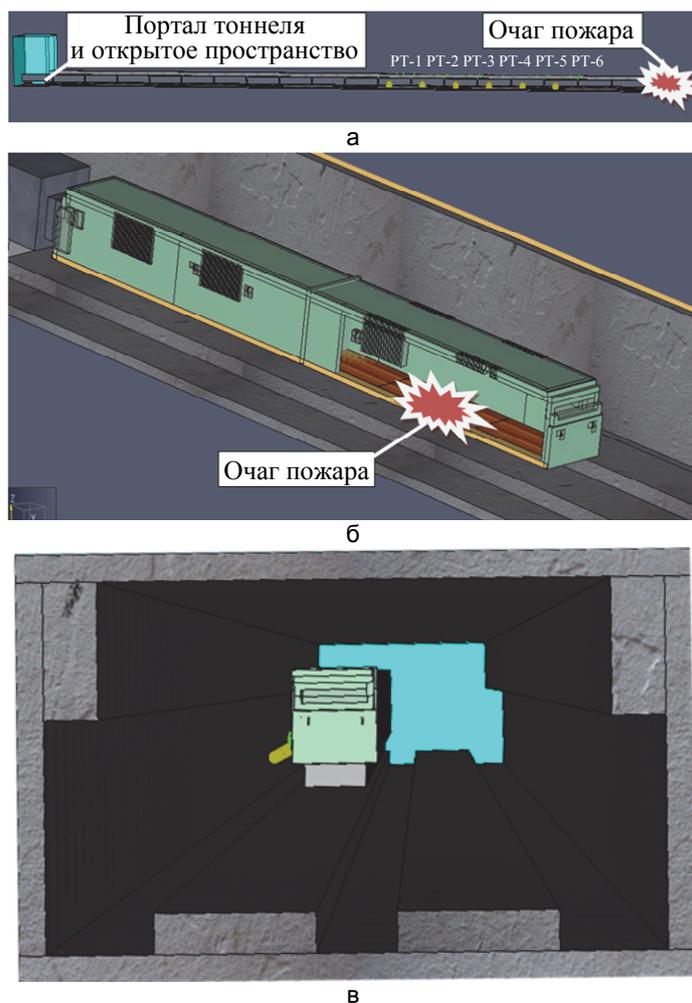


Рис. 1. Расчетная модель пожара локомотива: вид сбоку модели тоннеля с припортальным пространством (а); вид очага пожара в локомотиве подвижного состава (б); поперечное сечение тоннеля с аварийным составом на первом пути (в)

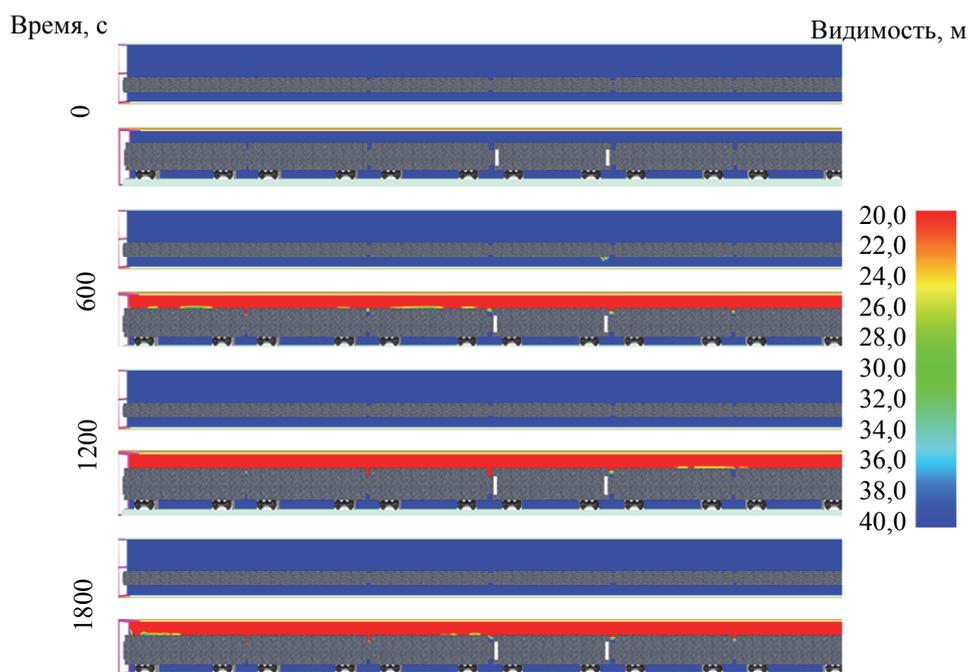


Рис. 2. Изменение видимости по длине тоннеля при пожаре пассажирского вагона

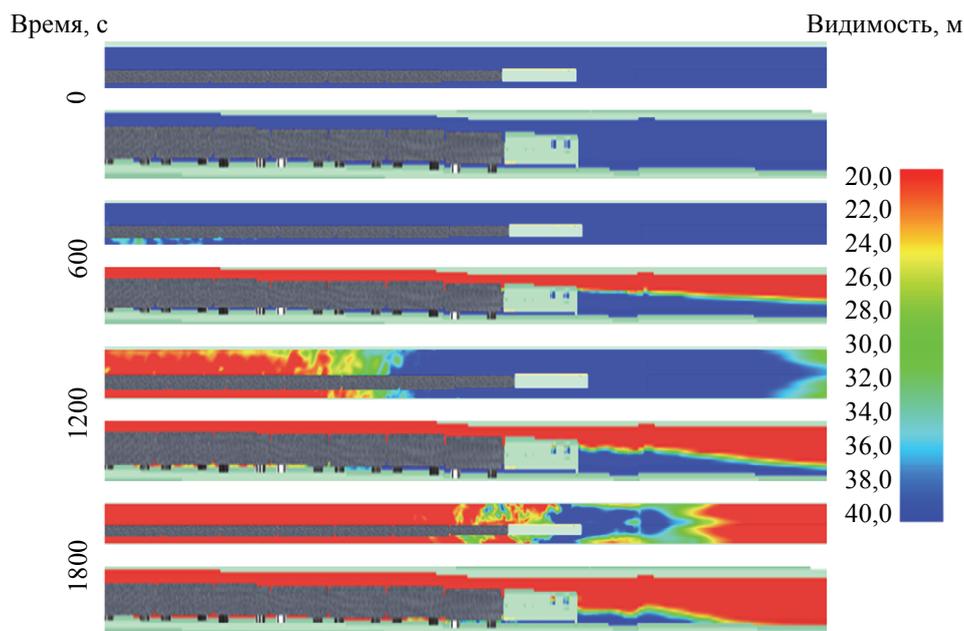


Рис. 3. Изменение видимости по длине тоннеля при пожаре локомотива

Заключение

Проведен анализ конструктивных особенностей применяемых на российской железной дороге локомотивов и пассажирских вагонов, определены противопожарные характеристики и приведенная пожарная нагрузка материалов, используемых в их конструкции, а также выполнены аналитические расчеты, и впервые получена оценка мощности пожара подвижного состава с учетом особенностей его конструкции.

На основе приведенной математической модели развития и распространения пожара, реализованной в FDS, и результатов аналитической оценки мощности получены уникальные результаты численного моделирования развития пожара подвижного состава в тоннеле и динамики распространения опасных факторов пожара.

К особенностям развития пожаров в тоннелях следует отнести:

- быстрое задымление объема тоннеля;
- высокие концентрации токсичных продуктов горения;
- высокую температуру как в зоне очага пожара, так и на значительных расстояниях от него, что делает при развитых пожарах невозможным эффективное использование средств пожаротушения;
- возможность повреждения и даже обрушения обделки тоннеля;
- ограниченные возможности обеспечения безопасной эвакуации, ведения спасательных работ и работ по ликвидации горения, особенно в тоннелях с одной выработкой.

Масштабы и последствия пожаров зависят от протяженности, конструктивных и объемно-планировочных особенностей тоннеля, характеристик вносимой в тоннель пожарной нагрузки, принятой системы противопожарной защиты и от оперативности принимаемых мер по тушению.

Проведенное моделирование показало, что аварийная ситуация с наибольшей пиковой мощностью пожара не всегда является наиболее опасной. Кроме этого параметра и объема выработки продуктов горения, при выборе проектных аварий необходимо учитывать также динамику развития пожара и распространения продуктов горения по объекту защиты, возможное нарушение стратификации из-за теплообмена или вихревого течения, количество вовлеченных в ситуацию людей и другие значимые факторы.

С учетом всех этих факторов наиболее опасным вариантом по сочетанию всех факторов является пожар локомотива пассажирского поезда. В таком сценарии, равно как и при пожаре пассажирского вагона, в аварийную ситуацию вовлечено большое количество людей, имеется достаточно большая мощность пожара, а также значительно более высокая динамика нарастания концентраций опасных продуктов горения, в том числе хлор-, азот-, серосодержащих соединений; кроме того, при такой ситуации отсутствует возможность вывода аварийного состава за пределы тоннеля, в отличие от пожара обычного пассажирского вагона.

Литература

1. Fire in Tunnels. Technical Report – Part 1. Design Fire Scenarios. Fire in Tunnels. Brussels, Belgium, 2006. 161 p.
2. Design Fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport // STUVA, 2010.
3. PIARC Committee on Road Tunnels: Fire and Smoke Control in Road Tunnels // PIARC report 05.05.B. Paris, 1999.
4. State Rail Authority fire incident database 1991-2000 hardcopy. Sydney, Melbourne, 2000.
5. Haack A. Real fires and design fires // Proc. Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles. Barcelona, Spain, 2011.
6. Haack A. Latest achievement and perspectives in tunnel safety // Tunneling and Underground Space Technology. 2004. V. 19. N 4–5.
7. White N. Fire Development in Passenger Trains. Master Thesis. Victoria University, 2010. 323 p.
8. Пожар в австрийском тоннеле // Подземное пространство мира. 2001. №1-2. С. 75–76.
9. Todesfalle Tunnel // FOCUS Magazin. 2000. N47.
10. Barnett J. Events driving fire safety for sea road and rail // Sea Road Rail Fire Safety Conference. Melbourne, Australia, 2005.
11. Ingason H., Lönnemark A. Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature developments in tunnels // Proc. 1st Int. Symposium on Safe & Reliable Tunnels. Prague, Czech Republic, 2004.
12. Fire Dynamic Simulator (Version 6). Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model. Washington: NIST Special Publication, 2015. 173p.
13. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник. М.: Пожнаука, 2004.

Авторы

Данилов Андрей Игоревич – аспирант, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация; главный специалист, ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, 191002, Российская Федерация, adanilav@gmail.com

Сиваков Иван Анатольевич – кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; начальник отдела автоматизации проектирования, ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, 191002, Российская Федерация, i.a.sivakov@gmail.com

Пилипенко Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Pilipenko38@mail.ru

Петров Антон Вячеславович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Groomer2795@gmail.com

Костерева Полина Александровна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pakostereva@corp.ifmo.ru

References

1. *Fire in Tunnels. Technical Report – Part 1. Design Fire Scenarios. Fire in Tunnels.* Brussels, Belgium, 2006, 161 p.
2. Design Fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport. *STUVA*, 2010.
3. PIARC Committee on Road Tunnels: Fire and Smoke Control in Road Tunnels. *PIARC report 05.05.B.* Paris, 1999.
4. *State Rail Authority fire incident database 1991-2000 hardcopy.* Sydney, Melbourne, 2000.
5. Haack A. Real fires and design fires. *Proc. Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles.* Barcelona, Spain, 2011.
6. Haack A. Latest achievement and perspectives in tunnel safety. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2004, vol. 19, no. 4–5.
7. White N. *Fire Development in Passenger Trains. Master Thesis.* Victoria University, 2010, 323 p.
8. Fire in the Austrian tunnel. *Podzemnoe Prostranstvo Mira*, 2001, no. 1-2, pp. 75–76.
9. Todesfalle Tunnel. *FOCUS Magazin*, 2000, no. 47.
10. Barnett J. Events driving fire safety for sea road and rail. *Sea Road Rail Fire Safety Conference.* Melbourne, Australia, 2005.
11. Ingason H., Lönnemark A. Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature developments in tunnels. *Proc. 1st Int. Symposium on Safe & Reliable Tunnels.* Prague, Czech Republic, 2004.
12. *Fire Dynamic Simulator (Version 6). Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model.* Washington, NIST Special Publication, 2015, 173p.
13. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. *Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Extinguishing Agents. Reference Book.* Moscow, PozhNauka Publ., 2004.

Authors

Andrey I. Danilov – postgraduate, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; Principal engineer, JSC S&R Design and Survey Institute "Lenmetrogiprotrans", Saint Petersburg, 191002, Russian Federation, adanilav@gmail.com

Ivan A. Sivakov – PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of CAD-Department, JSC S&R Design and Survey Institute "Lenmetrogiprotrans", Saint Petersburg, 191002, Russian Federation, i.a.sivakov@gmail.com

Nikolay V. Pilipenko – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Pilipenko38@mail.ru

Anton V. Petrov – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Groomer2795@gmail.com

Polina A. Kostereva – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pakostereva@corp.ifmo.ru