

Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта

© А. Ю. Шебеко¹, Н. И. Константинова^{1✉}, С. Г. Цариченко²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

² ООО "АТЛАС" (Россия, 115191, г. Москва, ул. Новая Заря, 6)

РЕЗЮМЕ

Введение. Широкое применение для обустройства пассажирских вагонов (шторы, обивка и чехлы кресел и диванов, постельные принадлежности) имеют ткани из огнезащищенных, химически модифицированных полиэфирных волокон, удовлетворяющие зарубежным требованиям. Экспериментальные исследования параметров пожарной опасности таких трудновоспламеняемых тканей согласно российским требованиям к материалам для отделки вагонов показали невозможность достижения нормативных критериев по токсичности продуктов горения и дымообразующей способности из-за особенностей процесса их термического разложения. Поэтому важной задачей является проведение комплексных исследований по обоснованию возможности установления реально приемлемых численных значений критериев токсичности продуктов горения и дымообразования.

Проблематика вопроса. Особенностью термического разложения полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является его способность при высоких температурах находиться в вязкотекучем состоянии. Наиболее эффективный метод огнезащиты волокон из ПЭТФ – химическое модифицирование на стадии их получения за счет введения в процесс синтеза фосфороганических функциональных соединений. Широкое применение в обустройстве вагонов огнезащищенных тканей значительно сдерживается из-за их несоответствия требованиям по дымообразующей способности и показателю токсичности продуктов горения.

Результаты и их обсуждение. Введение в полимерную цепь ПЭТФ замедлителей горения, не влияющих на условия технологической переработки, возможно при их содержании не более 10 % (масс.). Такое количество антипирена обеспечивает устойчивость материала к воспламенению и распространению пламени по поверхности, отсутствие образования горящего расплава, но не изменяет существенно показатель токсичности продуктов горения и коэффициент дымообразования. Представлены экспериментальные данные по токсичности продуктов горения (выход CO и CO₂ в режиме пламенного горения) трудновоспламеняемых, медленно распространяющих пламя по поверхности тканей из огнезащищенных полиэфирных волокон. Проведено со-поставление результатов определения показателя токсичности продуктов горения для тканей с результатами расчетов обобщенного индекса токсичности CIT_g.

Выводы. Установлено критериальное значение CIT_g(0,75) для оценки возможности применения текстильных материалов в спальных вагонах железнодорожного транспорта, соответствующее показателю токсичности продуктов горения от 34 до 52 мг/м³ (43 мг/м³ ± 20 %), что свидетельствует о возможности применения тканей с показателем токсичности продуктов горения HCl₅₀ ≥ 35 мг/м³. Разработаны предложения по совершенствованию требований пожарной безопасности к текстильным материалам, применяемым в пассажирских вагонах железной дороги.

Ключевые слова: внутренняя отделка вагонов; полиэтилентерефталат; огнезащищенные полиэфирные волокна; токсичность продуктов горения; дымообразующая способность.

Для цитирования: Шебеко А. Ю., Константинова Н. И., Цариченко С. Г. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2020. – Т. 29, № 1. – С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.32-42.

[✉] Константинова Наталия Ивановна, e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for rail vehicles

© Aleksey Yu. Shebeko¹, Nataliya I. Konstantinova^{1✉}, Sergey G. Tsarichenko²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

² Open Liability Company "ATLAS" (Novaya Zarya St., 6, Moscow, 115191, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Wide application for the arrangement of passenger railcars (curtains, upholstery and covers of chairs and sofas, bedding) is occupied by fabrics made of fire-proof, chemically modified polyester fibers that meet foreign requirements. An experimental study of the parameters of fire hazard of such a fire-resistant textiles according to the Russian requirements to furnish railcars showed the impossibility of achieving normative criteria on the toxicity of combustion products and smoke-forming ability because of the peculiarities of the process of thermal decomposition. Therefore, an important task is to conduct a comprehensive research on the feasibility of establishing realistic numerical values of criteria of toxicity of products of combustion and smoke generation.

Problem of the issue. A feature of the thermal decomposition of polyethylene terephthalate (PET) is its ability to be in a viscous state at high temperatures. The most effective method of fire protection of PET fibers is chemical modification at the stage of their production due to the introduction of organophosphorus functional compounds in the synthesis process. Wide application in the construction of railcars, flameproof tissue is significantly hampered by their failure to comply with the requirements for smoke generation ability and toxicity index of combustion products.

Results and discussion. Introduction in the polymer chain of PET retardants that do not affect the conditions of technological processing, possibly with their contents not more than 10 % by mass. This amount of flame retardant provides the material's resistance to ignition and flame spread on the surface, lack of education burning melt, but does not alter significantly the toxicity index of combustion products and the rate of smoke generation. Experimental data on the toxicity of combustion products (the yield of CO and CO₂ in the mode of flaming combustion) flame retardant, low flame on the surface of the fabrics, flameproof polyester fibres. A comparison of the results of determination of toxicity index of products of combustion to the results of calculations of the generalized index of toxicity (CIT_g).

Conclusions. The criterion value of CIT_g (0.75) was established for evaluating the possibility of using textile materials in railway sleeping railcars, corresponding to the index of toxicity of combustion products from 34 to 52 mg/m³ (43 mg/m³ ± 20 %), which indicates the possibility of using fabrics with the index of toxicity of combustion products HCl₅₀ ≥ 35 mg/m³. Proposals have been developed to improve fire safety requirements for textile materials used in passenger railcars.

Keywords: interior decoration of vehicles, terephthalate; fire-proof polyester fibers, toxicity of combustion products; smoke development.

For citation: A. Yu. Shebeko, N. I. Konstantinova, S. G. Tsarichenko. Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for rail vehicles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 32–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.32-42.

✉ Nataliya Ivanovna Konstantinova, e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Введение

Вопросы, связанные с пожарной безопасностью в пассажирских вагонах железной дороги, остаются актуальными, несмотря на большое количество стандартов, норм, правил и технической документации, регламентирующих требования, направленные на обеспечение пожарной безопасности железнодорожного подвижного состава и пассажирских перевозок.

Одним из важных аспектов обеспечения пожарной безопасности является совершенствование нормативных требований и методов испытаний материалов для внутренней отделки пассажирских вагонов.

Массовое пребывание людей в ограниченном замкнутом пространстве, трудности организации эвакуации пассажиров, возможность тушения возгораний и пожаров только первичными средствами пожаротушения, отсутствие систем дымоудаления и другие обстоятельства предъявляют повышенные требования пожарной безопасности, в том числе к материалам для внутренней отделки вагонов.

Европейская практика оценки характеристик пожарной опасности отделочных материалов для пассажирских вагонов согласно EN 45545-2 [1] предусматривает определение воспламеняемости, тепловыделения, распространения пламени по поверхности,

дымообразующей способности и токсичности продуктов горения.

Значительную долю материалов, используемых для декорации и отделки пассажирских вагонов (шторы, обивка и чехлы кресел и диванов, постельные принадлежности), в мировой практике занимают выпускаемые в промышленном масштабе ткани из огнезащищенных, химически модифицированных полимерных волокон, обладающих рядом ценных эксплуатационных свойств — прочностью, устойчивостью к истиранию, воздействию ультрафиолетовых лучей и стирке, несминаемостью и пр.

Известные результаты испытаний тканей из волокон этого вида на пожарную опасность, проведенных в европейских лабораториях, свидетельствуют о полном соответствии их международным нормативным требованиям Морского регистра, железнодорожного пассажирского и авиационного транспорта, а также автомобильной промышленности.

В России регламентация пожарной безопасности текстильных материалов проводится по таким показателям, как воспламеняемость (по ГОСТ Р 50810), токсичность продуктов горения, коэффициент дымообразования и индекс распространения пламени по поверхности (по ГОСТ 12.1.044–89). При этом показатель токсичности текстильных материалов должен

быть не ниже 40 г/м³, коэффициент дымообразования — не выше 1000 м²/кг; материалы должны относиться к группе трудновоспламеняемых и не распространять или медленно распространять пламя по поверхности.

Между тем аналитические и экспериментальные исследования свойств пожарной опасности тканей из огнезащищенных модифицированных полиэфирных волокон, наиболее широко применяемых для занавесей, штор, обивки мягкой мебели пассажирских вагонов, показали невозможность в ряде случаев достигнуть нормативных критериев по токсичности продуктов горения и дымообразующей способности из-за особенностей процесса их термического разложения.

Целью написания настоящей статьи является проработка комплексных исследований характеристик пожарной опасности текстильных материалов на основе полизэфирных волокон, модифицированных замедлителями горения различного типа, и обоснование возможности установления реально приемлемых численных значений показателя токсичности продуктов горения и коэффициента дымообразования. Для достижения этой цели были решены следующие основные задачи: проанализированы нормативные требования, регламентирующие пожарную безопасность материалов для внутренней отделки пассажирских вагонов железной дороги в России и за рубежом; проведены комплексные исследования оценки токсичности продуктов горения и дымообразующей способности трудновоспламеняемых текстильных материалов на основе полизэфирных волокон, модифицированных наиболее эффективными замедлителями горения; выполнен расчет обобщенного индекса токсичности, определяющего возможность применения данных материалов в вагонах железной дороги в соответствии с европейскими требованиями с точки зрения их токсикологической опасности при терморазложении и горении, для со-поставления с результатами оценки показателя токсичности продуктов горения по ГОСТ 12.1.044.

Проблематика вопроса

Особенностью термического разложения полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является его способность при высоких температурах находиться в вязкотекучем состоянии [2–4].

Механизм термоокислительной деструкции ПЭТФ достаточно изучен, носит радикально-цепной характер и протекает первоначально с разрывом молекулярной цепи, после чего идут вторичные реакции, приводящие к выходу летучих низкомолекулярных соединений и нелетучего остатка. Путем введения замедлителей горения блокируются реакции

термолиза и существенным образом снижается интенсивность процесса горения полиэфира [5–7].

Известно, что к эффективным замедлителям горения относятся фосфорсодержащие соединения, проявляющие активность как в газовой, так и в конденсированной фазах термоокислительной деструкции ПЭТФ [8–11].

Наиболее перспективным и эффективным методом огнезащиты волокон из ПЭТФ является химическое модифицирование на стадии их получения за счет введения в процессе синтеза полиэтилентерефталата фосфороганических функциональных соединений, способных вступать в реакцию конденсации или этерификации с концевыми группами ПЭТФ. При взаимодействии замедлителя горения с концевыми COOH-группами олигомеров ПЭТФ обеспечивается ковалентное встраивание фосфора в макромолекулу полимера [12].

Одним из таких видов огнезащищенных модифицированных полиэфирных волокон для изготовления тканей, получивших достаточно широкое применение на различных видах транспорта за рубежом, являются, например, волокна, в которых в качестве антиприренов используются оксипроизводные фосфолана, например 2-карбоксиэтилметилфосфоновая кислота, известная под торговой маркой “Тревира CS”.

Требования по пожарной безопасности в отечественных нормативных документах начала 90-х годов, предъявляемые к материалам для внутреннего обустройства пассажирских вагонов железных дорог, основаны на оценке горючести, распространения пламени, дымообразующей способности и токсичности продуктов термического разложения используемых материалов, а с 2003 г. в ВНПБ-03 "Вагоны пассажирские. Требования пожарной безопасности" были введены требования по пожарной опасности отдельно для текстильных материалов и изделий.

Дальнейшее развитие нормативной базы нашло отражение в стандартах, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, и в принятом в 2011 г. Техническом регламенте Таможенного союза “О безопасности железнодорожного подвижного состава” (ТР ТС-001–2011) [13], согласно которому на добровольной основе осуществляется оценка соответствия продукции, в том числе на пожарную опасность.

В настоящее время в поддержку ТР ТС-001-2011 в рамках выполнения программы работ по межгосударственной стандартизации разрабатывается межгосударственный стандарт “Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования пожарной безопасности. Методики испытаний по оценке пожароопасных свойств неметаллических материалов”. Разработка данного стандарта направлена на установле-

ние единых требований по обеспечению пожарной безопасности железнодорожного подвижного состава и пассажирских перевозок на межгосударственном уровне.

Существующие требования пожарной безопасности и методы оценки ее показателей для текстильных материалов и изделий, применяемых для обустройства пассажирских вагонов железной дороги (воспламеняемость, группа горючести, распространение пламени по поверхности, дымообразующая способность и токсичность продуктов горения), практически не отличаются от требований, предъявляемых к облицовочным материалам потолков, поверхностей стен, перегородок, мебели и декоративных покрытий вагонов.

Исключение составляет оценка воспламеняемости тканей, характеризующей их способность к воспламенению и определяемой временем с момента воздействия источника зажигания до устойчивого самостоятельного горения (тления).

Для оценки воспламеняемости тканей для занавесей, штор, обивки спальных полок, диванов и кресел в настоящее время применяется ГОСТ Р 50810–95. Метод оценки воспламеняемости предусматривает испытания текстильных материалов в вертикальном положении. Это объясняется тем, что при вертикальном положении образца и воздействии на него пламени снизу нагрев обусловлен переносом тепла от пламени в результате естественных конвективных процессов. Для того чтобы в испытаниях учитывалась структура материала, ткань испытывают по утку и по основе, принимая в качестве результата наихудшее значение. Кроме того, фиксируется возможность загорания хлопчатобумажной ваты, расположенной под образцом, в случае образования горящего расплава.

Распространение пламени по поверхности тканей и пленок определяют по достижению фронтом пламени контрольных отметок на образце ткани и времени его прохождения в условиях специальных испытаний по методике, аналогичной методу ГОСТ 12.1.044 (п. 4.19). Критерием является безразмерная величина — индекс распространения пламени (I_1), по численному значению которого осуществляется классификация материалов. Для текстильных материалов индекс распространения пламени не должен превышать 20.

Материалы, применяемые для изготовления диванов и сидений, в том числе обивочные ткани, проходят оценку пожарной опасности в конструкции по способности сопротивляться возгоранию при воздействии теплового импульса нормированной мощности — 100 г газетной бумаги (1-й метод) или газовой горелки (2-й метод), что соответствует стандартным испытаниям, принятym за рубежом [14].

Опыт испытаний по оценке вышеуказанных параметров пожарной опасности для текстильных материалов на основе огнезащищенных химически модифицированных полиэфирных волокон показал, что эффективно огнезащищенная ткань или материал на ее основе не соответствует установленным требованиям ГОСТ Р 55183–2012 по коэффициенту дымообразования и показателю токсичности продуктов горения.

Для установления возможности изменения численных значений показателей пожарной опасности химически модифицированных термопластичных волокон на основе полиэфира в нормативных требованиях по их пожаробезопасному применению в вагонах железной дороги были проведены комплексные экспериментальные исследования в условиях стандартных испытаний согласно ГОСТ 12.1.044–89 и ГОСТ Р 55183–2012.

Результаты и их обсуждение

Как уже было отмечено выше, огнезащищенные полиэфирные волокна или нити можно получить путем введения замедлителей горения в расплав полимера при его формировании, что позволяет сохранить обычную технологию их переработки. Наиболее приемлемыми с точки зрения обеспечения огнезащиты и сохранения эксплуатационных свойств остаются различные комплексные фосфоразотсодержащие замедлители горения, вступающие в реакцию взаимодействия с функциональными группами полимера. В присутствии антиприренов указанного типа происходит усиление структурирования и коксообразования, а также ингибирование окислительных процессов как в газовой, так и в конденсированной фазах [8–11]. Однако введение в полимерную цепь замедлителей горения может привести к структурной и химической неоднородности полимера, изменению его свойств, в частности плавления и вязкости расплава, что, в свою очередь, может негативно отразиться на условиях технологической переработки, поэтому их содержание, как правило, не превышает 10 % (масс.), а область оптимальных концентраций фосфора находится в пределах 0,4–0,8 % (масс.) [12].

Таким образом, модификация полиэфира в целях получения огнезащитного эффекта (устойчивости к воспламенению и распространению пламени по поверхности, отсутствия образования горящего расплава) происходит путем введения такого минимального и достаточного количества антиприrena, которое не влияет на физико-механические показатели полимера. При этом не могут существенно изменяться значения показателей токсичности продуктов горения и дымообразующей способности полимера.

Данных по исследованию влияния замедлителей горения на токсичность продуктов горения поли-

меров явно недостаточно, однако анализ имеющихся результатов экспериментов оценки токсичности текстильных материалов из огнезащищенных полиэфирных волокон позволил сделать вывод, что основными выделяющимися летучими соединениями являются оксид углерода CO и диоксид углерода CO₂ [15–19].

Результаты испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.20) некоторых видов трудновоспламеняемых, медленно распространяющих пламя по поверхности огнезащищенных тканей на основе модифицированных полиэфирных волокон, наиболее широко используемых в настоящее время для отделки и декора пассажирских вагонов, представлены в табл. 1. При проведении опытов фиксировались значения концентрации CO, CO₂ и кислорода O₂.

Для оценки влияния огнезащитных составов на выход газообразных продуктов термического разложения тканей из модифицированных полиэфирных волокон проводились сравнения значений выхода

CO и CO₂ в режиме пламенного горения. Представленные данные являются обобщением полученных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России результатов испытаний по определению показателя токсичности продуктов горения для текстильных полимерных материалов, область применения которых включает в том числе пассажирские железнодорожные вагоны. При этом в настоящей работе не было проведено какой-либо предварительной выборки экспериментальных данных (для конкретных материалов) по тому или иному критерию в силу отсутствия исчерпывающей информации о химическом составе замедлителей горения представленных на испытания полиэфирных текстильных материалов.

Из результатов экспериментов следует, что трудновоспламеняемые ткани из полиэфирных волокон, модифицированных полиэфирных волокон и смесей полиэфирных и модифицированных полиэфирных волокон в различных соотношениях могут относиться в большинстве случаев к высокоопасным по по-

Таблица 1. Количество выделившихся оксида и диоксида углерода в режиме горения (в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89) тканей различного состава на основе полиэфирных волокон

Table 1. The amount of carbon oxide and dioxide released in the combustion mode (in accordance with paragraph 4.20 of GOST 12.1.044–89) of textiles of various compositions based on polyester fibers

Номер образца Sample number	Состав ткани Composition textile	Поверхностная плотность ткани, г/м ² Surface density of the textile, g/m ²	Начальная масса, г Initial weight, g	Параметры разложения Parameters decompositions		Потеря массы, % Mass loss, %	Выход, мг/г Output, mg/g		Показатель токсичности HCl ₅₀ Indicator of toxicity HCl ₅₀	CIT _g
				T _{разл} , °C T _{decomp} , °C	τ _{разл} , мин τ _{decomp} , min		CO	CO ₂		
1	ПЭ 100 % Polyester 100 %	307	1,96	650	14	>99	132	1341	36	0,93
2	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	250	1,60	650	14	96	152	1313	38	0,86
3	ПЭ* 100 % (Тревира CS) Polyester* 100 % (Trevira CS)	490	3,13	650	12	96	145	1037	38	1,78
4	ПЭ* 100 % (Тревира CS) Polyester* 100 % (Trevira CS)	400	2,56	650	12	97	143	1438	40	1,56
5	ПЭ FR 60%; ПЭ 40 % Polyester FR 60%; Polyester 40 %	200	1,28	650	15	98	143	1323	37	1,32
6	ПЭ FR 64%; ПЭ 36 % Polyester FR 64%; Polyester 36 %	75	0,48	650	14	98	161	1587	36	1,52
7	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	335	2,14	750	9	98	217	924	27	1,43
8	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	330	2,11	650	9	96	205	1052	29	0,75
9	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	415	2,65	750	9	95	200	1164	31	0,28

* Модифицированные огнезащищенные полиэфирные волокна различных производителей.

Modified fire-resistant polyester fibers from various manufacturers.

казателю токсичности продуктов горения в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 (при экспозиции 30 мин показатель токсичности $HCl_{50} = 27 \div 40$). Разброс численных значений параметров токсичности продуктов термического разложения ткани из огнезащищенных волокон может быть связан с отличием огнезащитных свойств сырья (волокон и нитей) от разных поставщиков, а также с различиями в технологическом цикле производства готовой продукции.

Тем не менее представленные в табл. 1 данные позволяют разделить прошедшие испытания материалы по диапазонам значений показателя токсичности продуктов горения на две группы: от 27 до $31 \text{ кг}/\text{м}^3$ и от 36 до $40 \text{ кг}/\text{м}^3$. Материалы в указанных группах характеризуются незначительными различиями в количествах оксида и диоксида углерода, выделяющихся при горении.

Введение в полимерные волокна эффективных огнезадерживающих систем, безусловно, повышает устойчивость текстильных материалов к воспламенению и распространению пламени по поверхности (материалы трудновоспламеняемые по ГОСТ Р 50810, медленно распространяющие пламя по поверхности в соответствии с п. 4.19 ГОСТ 12.1.044–89), но по показателю токсичности продуктов горения большинство из них остается в группе высокоопасных материалов ($HCl_{50} \leq 40$).

Анализ результатов оценки количества выхода основного токсиканта — CO в процессе горения тканей из огнезащищенных полимерных волокон показал, что для групп образцов № 2–6 и № 7–9 оно составляет соответственно 143–161 и 200–217 мг/г, отличаются и значения показателя токсичности продуктов горения HCl_{50} — 40–36 и 27–31.

Данное обстоятельство может быть связано с различными химическими составами применяемых огнезадерживающих систем и, как следствие, с различным характером механизма их действия при термоокислительной деструкции полимера.

Основным критерием пожарной безопасности для термопластичных полимерных текстильных материалов, используемых в том числе в вагоностроении, остается устойчивость к воспламенению; при этом обязательно должно отсутствовать пламенное горение и образование горящего расплава, способного приводить к возгоранию пожарной нагрузки. Поэтому вполне можно допустить использование огнезащищенных полимерных тканей, устойчивых к воспламенению и медленно распространяющих пламя по поверхности, с показателем токсичности не ниже 35 с учетом результатов анализа, изложенного ниже.

Определение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 подразумевает необходи-

мость измерения количественного выхода CO, CO₂, цианистого водорода HCN, оксидов азота, альдегидов и других веществ в зависимости от состава материала при анализе продуктов термоокислительного разложения и горения. Тем не менее, как правило, при проведении испытаний согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 контролируется выход только оксида и диоксида углерода. Покажем на примере полиэтилентерефталата, что для полимерных волокон практически единственными газообразными продуктами термического разложения и горения, помимо водяного пара H₂O, являются оксид и диоксид углерода. Из брутто-формулы полиэтилентерефталата (C₁₀H₈O₄)_n следует, что массовая доля атомов водорода в молекуле [H]_{massc} = 4 % (масс.), массовая доля атомов кислорода [O]_{massc} = 33 % (масс.). Исходя из результатов измерения количественного выхода CO и CO₂, можно оценить, какая часть исходного горючего пошла на образование указанных газообразных продуктов термического разложения и горения. При этом очевидно, что на образование оксида и диоксида углерода пошла только та часть исходного горючего, которая содержит атомы углерода C. Тогда массы горючего, пошедшего на образование CO и CO₂, соответственно, без учета возможности участия в их образовании кислорода, содержащегося в исходной молекуле горючего, могут быть определены следующим образом:

$$M_{CO} = m_{CO} m_0 \cdot 0,43;$$

$$M_{CO_2} = m_{CO_2} m_0 \cdot 0,27,$$

где M_{CO} , M_{CO_2} — массы горючего, пошедшего на образование CO и CO₂, кг;

m_{CO} , m_{CO_2} — выход CO и CO₂ на единицу массы горючего, кг/кг;

m_0 — начальная масса образца исследуемого материала, кг;

0,43 и 0,27 — массовые доли углерода C в молекулах CO и CO₂ соответственно.

Таким образом, массовая доля исходного горючего Y_{CO, CO_2} , пошедшего на образование CO и CO₂, может быть определена по формуле:

$$Y_{CO, CO_2} = \frac{M_{CO} + M_{CO_2}}{m_0}.$$

Кроме того, исходная масса горючего расходуется на образование дымовых частиц. По результатам испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.18) полимерные волокна относятся к материалам с высокой дымообразующей способностью. По данным табл. 2 значение коэффициента дымообразования для таких материалов находится в диапазоне от 980 до 1610 м²/кг. В ряде работ (см., например, [20, 21]) показано, что коэффициент дымообразования D_m

($\text{м}^2/\text{кг}$) взаимосвязан с массовой долей топлива Y_s , пошедшего на образование сажевых частиц, соотношением

$$Y_s = D_m / K_m,$$

где K_m — коэффициент поглощения света, $\text{м}^2/\text{кг}$, который изменяется сравнительно в узких пределах для полимерных материалов, древесины, а также материалов на ее основе и может быть принят для них равным $7600 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Таким образом, для полиэфирных волокон минимальное значение массовой доли топлива, пошедшего на образование дымовых (сажевых) частиц, составляет $Y_s = 980/7600 = 0,13$.

Исходя из вышесказанного и данных табл. 1, можно определить массовую долю исходного горючего, пошедшего на образование иных (помимо H_2O , CO и CO_2) газообразных продуктов термического разложения и горения. Так, например, для ПЭ 100 % (см. табл. 1, поз. 1) указанная массовая доля составляет (для расчета массовой доли горючего, пошедшего на образование сажевых частиц, принимается $D_m = 1500 \text{ кг}/\text{м}^2$):

$$\begin{aligned} Y_{\text{other}} &= 1 - [\text{O}]_{\text{масс}} - [\text{H}]_{\text{масс}} - Y_{\text{CO}, \text{CO}_2} - Y_s = \\ &= 1 - 0,33 - 0,04 - 0,42 - 0,2 = 0,01. \end{aligned}$$

Из представленного примера расчета следует, что иные (помимо CO , CO_2 и H_2O) газообразные продукты термоокисления и горения полиэфирных волокон практически отсутствуют.

Как было уже отмечено, в странах Евросоюза область применения текстильных материалов в вагонах железнодорожного транспорта регламентирована положениями EN 45545-2 [1]. Материалы обивки мягкой мебели и мест для отдыха головы в спальных вагонах должны в соответствии с [1] отвечать следующим требованиям в части способности указанных материалов к дымообразованию при горении и терморазложении, а также токсичности продуктов горения:

- способность материала к дымообразованию $D_{s \max}$, определенная по результатам испытаний согласно ISO 5659-2 [17], должна составлять не более 200;
- обобщенный индекс токсичности CIT_g , характеризующий общее интегральное токсикологическое действие продуктов термического разложения и горения, определенный по результатам газового анализа продуктов в процессе испытаний согласно ISO 5659-2 [22], должен составлять не более 0,75.

Ввиду существенного отличия подходов, приведенных в п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89, ISO 5659-2 [22], EN 45545-2 [1], в целях оценки токсикологического действия продуктов термического разложения и горения полимерных материалов в настоящей работе

были проведены расчеты величины CIT_g согласно EN 45545-2 на основе результатов испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.20). Разумеется, такая оценка величины CIT_g является сугубо приблизительной (ориентировочной) по причине существенных различий в методологических подходах и применяемом испытательном оборудовании (см. п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 и ISO 5659-2 [22]).

Обобщенный индекс токсичности CIT_g согласно EN 45545-2 [1] рассчитывается следующим образом:

$$CIT_g = \frac{V_1 S_2}{V_2 S_1} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{c_i}{C_i},$$

где V_1 — объем камеры испытательной установки; для получения данных, представленных в табл. 1, $V_1 = 0,11 \text{ м}^3$;

V_2 — номинальный характерный объем пассажирского железнодорожного вагона; согласно EN 45545-2 [1] $V_2 = 150 \text{ м}^3$;

S_1 — площадь поверхности материала, экспонируемой тепловой нагрузкой в условиях стандартных испытаний; согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 $S_1 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;

S_2 — площадь поверхности материала, экспонируемой тепловой нагрузкой в условиях развития пожара в пассажирском вагоне; согласно EN 45545-2 [1] $S_2 = 0,1 \text{ м}^2$;

c_i — измеренная концентрация i -го газообразного продукта термического разложения и горения в объеме камеры испытательной установки, $\text{мг}/\text{м}^3$;

C_i — относительная концентрация i -го газообразного продукта термического разложения и горения, $\text{мг}/\text{м}^3$; $C_i = 1380 \text{ мг}/\text{м}^3$ для CO , $C_i = 72000 \text{ мг}/\text{м}^3$ для CO_2 .

Результаты расчетов CIT_g для исследованных в настоящей работе материалов представлены в табл. 1. Для определения значения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов по п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89, соответствующего критериальному значению $CIT_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1], была получена зависимость CIT_g от HCl_{50} . Через экспериментальные точки методом наименьших квадратов проведена прямая, имеющая следующее уравнение: $CIT_g = 2,81 - 0,048 \text{ HCl}_{50}$.

Из полученной зависимости следует, что величине $CIT_g = 0,75$, характеризующей выполнение требований EN 45545-2 [1] для материалов обивки мягкой мебели и мест для отдыха головы в спальных железнодорожных вагонах, соответствует $\text{HCl}_{50} = 43 \text{ мг}/\text{м}^3$. При этом необходимо отметить следующее. Во-первых, в соответствии с требованиями EN 45545-2 [1] для “стандартных” вагонов железной дороги (вагонов электропоездов с сидячими местами) критериальное значение CIT_g составляет 1,2, ему соответствует значение $\text{HCl}_{50} = 33,5 \text{ мг}/\text{м}^3$, что

отвечает высказанному ранее выводу о возможности применения текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HC_{50} не менее 35 мг/м³. Во-вторых, необходимо коснуться вопроса о точности метода определения показателя токсичности продуктов полимерных материалов, представленного в п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89. В соответствии с п. 4.20.4.5 ГОСТ 12.1.044–89 сходимость указанного метода при доверительной вероятности 95 % по выходу СО (мг/г) не должна превышать 15 %. При этом показатель токсичности продуктов горения определяется по результатам экспозиции биологического материала (белых мышей) и пробит-анализа результатов испытаний с различным уровнем летальности биологического материала (менее и более 50 %). Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что погрешность определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 составляет до 20 %. Таким образом, критериальному значению $\text{CIT}_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1] для оценки возможности применения текстильных материалов в спальных вагонах железнодорожного транспорта соответствует диапазон значений показателя токсичности продуктов полимерных материалов согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 от 34 до 52 мг/м³ ($43 \text{ мг/м}^3 \pm 20\%$). Это свидетельствует о возможности применения в вагонах железнодорожного транспорта текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HC_{50} не менее 35 мг/м³.

Наряду с определением токсичности продуктов разложения полизэфирных тканей, проводилась оценка их дымообразующей способности в соответст-

вии с п. 4.18 ГОСТ 12.1.044–89. Коэффициент дымообразования D_{cp} в настоящих исследованиях определялся в режиме тления — наиболее опасной стадии горения полимеров. Текстильные материалы на основе полизэфира относятся к высокоопасным по дымообразующей способности: коэффициент дымообразования находится в пределах от 1200 до 1600 м²/кг (табл. 2). Как показали проведенные исследования, модификация полимера замедлителями горения в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на численные значения показателя, поэтому получение текстильных материалов на основе полизэфирных волокон с требуемым по существующим нормативным документам коэффициентом дымообразования менее 1000 м²/кг, удовлетворяющим комплексу необходимых свойств, представляется весьма сложной задачей.

Выводы

Применяемые в настоящее время на различных видах транспорта ткани из огнезащищенных модифицированных ПЭ-волокон соответствуют существующим зарубежным нормативным требованиям пожарной безопасности.

Результаты комплексных исследований по оценке характеристик пожарной опасности огнезащищенных тканей на основе модифицированных волокон, которые характеризуются устойчивостью к воспламенению и нераспространением пламени по поверхности, в большинстве случаев показали невозможность получения материалов умеренноопасных по показателю токсичности продуктов горения и с коэффициентом дымообразования менее 1000 м²/кг.

Проведено сопоставление результатов определения показателя токсичности продуктов горения для указанных выше текстильных материалов с результатами расчетов обобщенного индекса токсичности, регламентирующего возможность применения данных материалов в вагонах железнодорожного транспорта в соответствии с европейскими требованиями с точки зрения их токсикологической опасности при терморазложении и горении.

Показано, что критериальному значению $\text{CIT}_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1] для оценки возможности применения текстильных материалов в спальных вагонах железнодорожного транспорта соответствует диапазон значений показателя токсичности продуктов полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 от 34 до 52 мг/м³ ($43 \text{ мг/м}^3 \pm 20\%$). Это свидетельствует о возможности применения в вагонах железнодорожного транспорта текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HC_{50} не менее 35 мг/м³.

Установлено, что модификация полимера замедлителями горения в большинстве случаев не оказы-

Таблица 2. Результаты экспериментального определения коэффициента дымообразования тканей различного состава на основе полизэфирных волокон

Table 2. Results of experimental determination of the smoke generation coefficient of fabrics of different composition based on polyester fibers

Состав ткани Composition textile	Коэффициент дымообразования, м ² /кг Smoke generation coefficient, m ² /kg
ПЭ 100 % Polyester 100 %	1456–1610
ПЭ FR 100 % Polyester FR 100 %	1230–1443
ПЭ FR 100 % (Тревира CS) Polyester FR 100 % (Trevira CS)	980–1137
ПЭ FR 60 %: ПЭ 40 % Polyester FR 60 %; Polyester 40 %	1260
ПЭ FR 64 %; ПЭ 36 % Polyester FR 64 %; Polyester 36 %	1166

вает существенного влияния на численные значения коэффициента дымообразования, поэтому получение текстильных материалов на основе полиэфирных волокон с требуемым по существующим нормативным документам коэффициентом дымообразования менее $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ и удовлетворяющим комплексу необходимых свойств пожарной безопасности практически невозможно.

Учитывая результаты настоящих исследований, имеющийся опыт оценки характеристик пожарной опасности материалов на основе огнезащищенных полиэфирных волокон, целесообразно при пересмотр-

те нормативных документов установить следующие требования пожарной безопасности к текстильным материалам, применяемым в пассажирских вагонах железной дороги:

- горючесть — трудновоспламеняемый (ГОСТ Р 50810-96);
- индекс распространения пламени — не более 20;
- коэффициент дымообразования — не более $1500 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- показатель токсичности при экспозиции 30 мин — не менее $35 \text{ г}/\text{м}^3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DS/EN 45545-2:2013+A1:2015. Railway applications — Fire protection on railway vehicles — Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components. — Brussels : CEN, 2015. — 75 p.
2. Weil E. D., Levchik S. V. Flame retardants for plastics and textiles. Practical Applications. — 2nd ed. — Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 2015. — 398 p. DOI: 10.3139/9781569905791.
3. Aseeva R. M., Zaikov G. E. Combustion of polymer materials. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1986. — 406 p.
4. Hirschler M. M. Safety, health and environmental aspects of flame retardants // Handbook of Fire Resistant Textiles / Kilinc F. S. (ed.). — Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013. — P. 108–173. DOI: 10.1533/9780857098931.1.108.
5. Horrocks A. R. Technical fibres for heat and flame protection // Handbook of Technical Textiles. Vol. 2: Technical Textile Applications / Horrocks A. R., Anand S. C. (eds.). — 2nd ed. — Woodhead Publishing Limited, Elsevier Ltd., 2016. — P. 237–270. DOI: 10.1016/b978-1-78242-465-9.00008-2.
6. Horrocks A. R. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovative solutions // Polymer Degradation and Stability. — 2011. — Vol. 96, No. 3. — P. 377–392. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036.
7. Joseph P., Tretsiakova-McNally S. Melt-flow behaviours of thermoplastic materials under fire conditions: Recent experimental studies and some theoretical approaches // Materials. — 2015. — Vol. 8, No. 12. — P. 8793–8803. DOI: 10.3390/ma8125492.
8. Wazarkar K., Kathalewar M., Sabnis A. Reactive modification of thermoplastic and thermoset polymers using flame retardants: An overview // Polymer-Plastics Technology and Engineering. — 2016. — Vol. 55, Issue 1. — P. 71–91. DOI: 10.1080/03602559.2015.1038839.
9. Бесшапоиникова В. И., Микрюкова О. Н., Загоруйко М. В., Штейнле В. А. Огнезащита смесевых тканей системой фосфоразотсодержащих замедлителей горения // Вестник Технологического университета. — 2017. — Т. 20, № 22. — С. 69–72.
10. Salmeia K., Fage J., Liang S., Gaan S. An overview of mode of action and analytical methods for evaluation of gas phase activities of flame retardants // Polymers. — 2015. — Vol. 7, No. 3. — P. 504–526. DOI: 10.3390/polym7030504.
11. Matzen M., Kandola B., Huth C., Schartel B. Influence of flame retardants on the melt dripping behaviour of thermoplastic polymers // Materials. — 2015. — Vol. 8, No. 9. — P. 5621–5646. DOI: 10.3390/ma8095267.
12. Зубкова Н. С., Константинова Н. И. Огнезащита текстильных материалов. — М. : Институт информационных технологий, 2008. — 228 с.
13. Технический регламент Таможенного союза “О безопасности железнодорожного подвижного состава” (ТР ТС 001/2011). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 20.11.2019).
14. Dzięcioł M., Huzar E. Study of compounds emitted during thermo-oxidative decomposition of polyester fabrics // Polish Journal of Chemical Technology. — 2016. — Vol. 18, No. 1. — P. 40–45. DOI: 10.1515/pjct-2016-0007.
15. van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis // Chemosphere. — 2012. — Vol. 88, No. 10. — P. 1119–1153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.
16. Braun E., Levin B. C. Polyesters: A review of the literature on products of combustion and toxicity // NBS publication, NBSIR 85–3139. — Washington : U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1985. — 64 p. DOI: 10.6028/nbs.ir.85-3139.

17. Zubkova N. S., Karelina I. M., Zaitsev A. A., Merkulov A. A., Konstantinova N. I. Toxicity of combustion products and smoking of decorative-finishing fabrics // *Fibre Chemistry*. — 2007. — Vol. 39, Issue 3. — P. 215–217. DOI: 10.1007/s10692-007-0044-5.
18. Wesolek D., Kozlowski R. Toxic gaseous products of thermal decomposition and combustion of natural and synthetic fabrics with and without flame retardant // *Fire and Materials*. — 2002. — Vol. 26, Issue 4–5. — P. 215–224. DOI: 10.1002/fam.800.
19. Леонова Д. И. Роль антипиренов в токсичности продуктов горения полимерных материалов // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2010. — № 3(21). — С. 121–131.
20. Разработка методики расчетов видимости при моделировании пожаров полевым методом с применением FDS. Исходные данные для расчета гражданских зданий. — Екатеринбург : Ситис, 2007. — 33 с.
21. Карькин И. Н. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. — 4-я ред. — 2016. — 27 с. URL: https://pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fire-load_lib.pdf (дата обращения: 20.11.2019).
22. ISO 5659-2. Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test. — 4th ed. — Geneva, Switzerland : ISO, 2017. — 49 p.

REFERENCES

1. DS/EN 45545-2:2013+A1:2015. *Railway applications — Fire protection on railway vehicles — Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components*. Brussels, CEN, 2015. 75 p.
2. E. D. Weil, S. V. Levchik. *Flame retardants for plastics and textiles. Practical Applications*. 2nd ed. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 2015. 398 p. DOI: 10.3139/9781569905791.
3. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov. *Combustion of polymer materials*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1986. 406 p.
4. M. M. Hirschler. Safety, health and environmental aspects of flame retardants. In: F. S. Kilinc (ed.). *Handbook of Fire Resistant Textiles*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 108–173. DOI: 10.1533/9780857098931.1.108.
5. A. R. Horrocks. Technical fibres for heat and flame protection. In: A. R. Horrocks, S. C. Anand (eds.). *Handbook of Technical Textiles. Vol. 2: Technical Textile Applications*. 2nd ed. Woodhead Publishing Limited, Elsevier Ltd., 2016, pp. 237–270. DOI: 10.1016/b978-1-78242-465-9.00008-2.
6. A. R. Horrocks. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovative solutions. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, vol. 96, no. 3, pp. 377–392. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036.
7. P. Joseph, S. Tretyakova-McNally. Melt-flow behaviours of thermoplastic materials under fire conditions: Recent experimental studies and some theoretical approaches. *Materials*, 2015, vol. 8, no. 12, pp. 8793–8803. DOI: 10.3390/ma8125492.
8. K. Wazarkar, M. Kathalewar, A. Sabnis. Reactive modification of thermoplastic and thermoset polymers using flame retardants: An overview. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, vol. 55, issue 1, pp. 71–91. DOI: 10.1080/03602559.2015.1038839.
9. V. I. Besshaposnikova, O. N. Mikryukova, M. V. Zagoruyko, V. A. Shteynle. Fire protection of mixed tissues by the system of phosphorus-nitrogen-containing retardants of combustion. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta / Herald of Technological University*, 2017, vol. 20, no. 22, pp. 69–72 (in Russian).
10. K. Salmeia, J. Fage, S. Liang, S. Gaan. An overview of mode of action and analytical methods for evaluation of gas phase activities of flame retardants. *Polymers*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 504–526. DOI: 10.3390/polym7030504.
11. M. Matzen, B. Kandola, C. Huth, B. Schartel. Influence of flame retardants on the melt dripping behaviour of thermoplastic polymers. *Materials*, 2015, vol. 8, no. 9, pp. 5621–5646. DOI: 10.3390/ma8095267.
12. N. S. Zubkova, N. I. Konstantinova. *Ognezashchita tekstilnykh materialov* [Fire protection of textile materials]. Moscow, MIREA — Russian Technological University Publ., 2008. 228 p. (in Russian).
13. *Technical regulation of the Customs Union “On the safety of railway rolling stock” (TR CU 001/2011)* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (Accessed 20 November 2019).
14. M. Dzięcioł, E. Huzar. Study of compounds emitted during thermo-oxidative decomposition of polyester fabrics. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 40–45. DOI: 10.1515/pjct-2016-0007.
15. I. van der Veen, J. de Boer. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 2012, vol. 88, no. 10, pp. 1119–1153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.

16. E. Braun, B. C. Levin. *Polyesters: A review of the literature on products of combustion and toxicity.* NBS Publication, NBSIR 85-3139. Washington, U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1985. 64 p. DOI: 10.6028/nbs.ir.85-3139.
17. N. S. Zubkova, I. M. Karelina, A. A. Zaitsev, A. A. Merkulov, N. I. Konstantinova. Toxicity of combustion products and smoking of decorative-finishing fabrics. *Fibre Chemistry*, 2007, vol. 39, issue 3, pp. 215–217. DOI: 10.1007/s10692-007-0044-5.
18. D. Wesolek, R. Kozlowski. Toxic gaseous products of thermal decomposition and combustion of natural and synthetic fabrics with and without flame retardant. *Fire and Materials*, 2002, vol. 26, issue 4-5, pp. 215–224. DOI: 10.1002/fam.800.
19. D. I. Leonova. The fire retardants contribution in combustive product toxicity of polymeric materials. *Aktualnyye problemy transportnoy meditsiny / Actual Problems of Transport Medicine*, 2010, no. 3(21), pp. 121–131 (in Russian).
20. Razrabotka metodiki raschetov vidimosti pri modelirovaniyu pozharov polevym metodom s primeneniem FDS. Iskhodnyye dannyye dlya rascheta grazhdanskikh zdaniy [Development of methods for calculating the visibility of fire modeling field method using FDS. Initial data for the calculation of civil buildings]. Ekaterinburg, SITIS Publ., 2007. 33 p. (in Russian).
21. I. N. Karkin. Work in the software complex FireCat. Library reactions and surfaces of combustion in PyroSim. Revision 4, 2016. 27 p. (in Russian). Available at: https://pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf (Accessed 20 November 2019).
22. ISO 5659-2. Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test. 4th ed. Geneva, Switzerland, ISO, 2017. 49 p.

Поступила 15.11.2019, после доработки 26.12.2019;
принята к публикации 15.01.2020

Received 15 November 2019; Received in revised form 26 December 2019;
Accepted 15 January 2020

Информация об авторах

ШЕБЕКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, начальник отдела пожарной безопасности строительных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

КОНСТАНТИНОВА Наталья Ивановна, д-р техн. наук, профессор, гл. научный сотрудник отдела пожарной безопасности строительных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, заместитель генерального директора ООО “АТЛАС”, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Information about the authors

Aleksey Yu. SHEBEKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Safety of Building Materials, All-Russian Research Institute for Fire Protection, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher at Department of Fire Safety of Building Materials, All-Russian Research Institute for Fire Protection, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director of Open Liability Company “ATLAS”, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru