

С.Л. Барботько¹, В.Н. Кириллов¹, Е.Н. Шуркова¹

ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены методы оценки пожарной опасности полимерных материалов, используемых при изготовлении и оформлении интерьера пассажирских салонов, багажно-грузовых отсеков и других пожароопасных зон самолетов. Применительно к перспективным широкофюзеляжным машинам, в которых полимерные композиционные материалы предназначены для изготовления фюзеляжа и оперения, сформулированы основные требования, которые должны применяться для оценки пожаробезопасности материалов внешнего контура.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, методы оценки пожарной безопасности, внешний контур самолетов.

S.L. Barbotko¹, V.N. Kirillov¹, E.N. Shurkova¹

FIRE SAFETY EVALUATION FOR POLYMER COMPOSITES OF AERONAUTICAL APPLICATION

The fire safety evaluation methods of polymer materials, being used for the production and decorative design of passenger compartments, luggage and freight sections along with other fire risk zones of aeroplanes, are considered in the paper. The basic requirements which should be used for the fire safety evaluation of outer contour materials have been formulated applied to advanced wide-body vehicles, in which polymer composites are designated for fuselage and fin assembly production.

Keywords: polymer composites, fire safety evaluation methods, outer aircraft contour.

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Первоочередной проблемой, которая требует решения с целью обеспечения конкурентоспособности, является снижение стоимости перевозок. Один из возможных способов решения этой задачи – уменьшение расхода топлива за счет удельного снижения массы самолета в расчете на одного пассажира или килограмм перевозимого груза, что может быть обеспечено при более широком использовании полимерных композиционных материалов (ПКМ) взамен традиционно применяемых металлических сплавов. В настоящее время доля применяемых полимеров колеблется от 5 до 15% в самолетах Ту-204, Ил-96, «Сухой Суперджет-100» и от 22 до 39% – в различных марках широкофюзеляжной зарубежной техники. Основные классы композитов, предназначенные для применения в самолетах, – углепластики и стеклопластики, которые широко используются при изготовлении и оформлении интерьера салона, панелей перегородок багажных и пассажирских отсеков, пола, радиопрозрачных обтекателей.

В последние годы с целью повышения весовой эффективности авиационной техники ведутся научно-исследовательские работы по определению возможности и целесообразности замены алюминиевых сплавов, используемых для изготовления фюзеляжа и оперения, на ПКМ, в частности, на углепластики. Такая замена позволит на 40% уменьшить массу конструкции, что обеспечит до 20% снижения расхода горючего [1]. Создание опытного экземпляра самолета В-787 корпорации «Boeing» с фюзеляжем, полностью выполненным из углеродных полимерных композиционных материалов (доля применения композитов в конструкции самолета 50–55%), свидетельствует о том, что широкомасштабный переход на использование ПКМ при изготовлении внешнего контура как для пассажирской, так и транспортной авиации, может произойти в ближайшие годы. В разрабатываемом российском гражданском самолете МС-21 из композиционных материалов предполагается выполнить крыло и хвостовое оперение (доля применения композиционных материалов в конструкции самолета составит ~40%).

Другой не менее важной задачей при эксплуатации авиатехники является обеспечение безаварийности полетов и максимальной безопасности пассажиров в случае возникновения пожара на борту или вокруг самолета. Пожары самолетов являются крайне редкими и происходят, как правило, в случае серьезных аварий. Однако вероятностью их возникновения нельзя пренебрегать, так как они могут привести к одновременному появлению большого количества человеческих жертв и нанесению существенного материального и экологического ущерба. Наиболее опасными являются аварийные ситуации при взлете или посадке с возникновением интенсивного внешнего пожара от разлившегося авиатоплива. При этом основными поражающими факторами являются: воздействие пламени и повышенных температур, низкая концентрация кислорода и воздействие токсичных продуктов горения. К вторичным поражающим факторам относятся: образование дыма при горении материалов, затрудняющее эвакуацию, а также механическое разрушение конструкций.

При отсутствии разрушения фюзеляжа пламя от горящего топлива воздействует только на внешние материалы корпуса, эвакуация людей осуществляется через люки и двери вне зоны воздействия пламени. Возможная продолжительность эвакуации фактически определяется следующими параметрами: огнестойкость (продолжительность сохранения целостности) внешней обшивки, эффективность действия теплоизоляции фюзеляжа, количество токсичных веществ, попадающих или образующихся внутри самолета, время до воспламенения полимерных материалов интерьера или достижения критической для выживания температуры воздуха в пассажирском салоне, а также продолжительность сохранения работоспособности средств аварийной эвакуации.

В условиях внешнего пожара фюзеляж из алюминиевого сплава прогорает под действием пламени в течение 30–60 с [2], после чего пламя начинает воздействовать на маты тепловой и акустической изоляции фюзеляжа, а при их разрушении – на материалы внутренней отделки багажного и пассажирского отсеков.

Использование ПКМ вместо алюминиевых сплавов может существенно изменить безопасность всей конструкции как с точки зрения механики разрушения, так и поведения в условиях пожара [3]. Применение ПКМ в конструкциях внешнего контура широкофюзеляжного самолета фактически эквивалентно добавлению в очаг пожара нескольких тонн горючего вещества с теплотворной способностью керосина, хотя и горящего с меньшей интенсивностью и полнотой сгорания. Под воздействием мощного

теплового потока и пламени большинство существующих конструкционных полимерных материалов воспламеняется и распространяет пламя по поверхности, что может привести к охвату огнем большей части композиционного фюзеляжа. Это в свою очередь может воспрепятствовать процессу эвакуации людей из потерпевшего аварию самолета и привести к многочисленным жертвам вследствие отравления токсичными продуктами термодеструкции и горения полимеров [4]. Однако, в отличие от алюминиевых сплавов, угле- или стеклопластики обладают существенно более высокой огнестойкостью и не имеют сквозного прогорания в течение 10–15 и более минут.

Требования по пожарной безопасности материалов, узлов и элементов конструкций пассажирских самолетов изложены в ряде пунктов Авиационных правил (АП-25 п.п. 853–857, 867, 1185–1203 и др.) [5] или аналогичных зарубежных нормах (FAR, CS). Учитывая актуальность проблемы оценки пожарной опасности полимерных материалов, в настоящее время разработано большое количество методов их оценки. В частности, за рубежом разработан справочник Aircraft material fire test Handbook [6], включающий 24 метода. В настоящее время в соответствии с требованиями Авиационных правил для оценки пожарной опасности материалов пассажирских салонов и багажно-грузовых отсеков самолетов используются методы горючести, тепловыделения, дымообразования, сопротивления сквозному прогоранию (огнестойкости и огнестойкости). Так как полимеры в настоящее время имеют ограниченное применение для изготовления отдельных деталей внешнего контура (радиопрозрачные обтекатели, элементы механизации крыла, рули высоты и направления), пожарная безопасность материалов этого функционального назначения (за исключением находящихся в зоне выхлопа двигателей) не нормируется требованиями Авиационных правил.

Широкое применение композиционных материалов для изготовления конструкций и узлов внешнего контура (фюзеляжа и крыла) самолета потребует от ПКМ совмещения как высоких механических свойств, так и пожаробезопасности, которой они на настоящий момент из-за отсутствия требований, как правило, не обладают. В последние годы за рубежом проводятся работы [2, 3, 7–18] по исследованию пожароопасных свойств ПКМ, перспективных для изготовления фюзеляжа самолетов, и совершенствованию методов оценки. Одновременно в ряде работ отмечается опасность использования ПКМ для конструкций фюзеляжа, в том числе с точки зрения возможности распространения пламени по поверхности и выделения большого количества дыма и токсичных веществ [1, 4, 19, 20].

Рассмотрим основные методы, используемые в настоящее время для оценки пожаробезопасности материалов внутренней отделки самолета, возможность и перспективность применения других методов с целью определения пожарно-технических свойств материалов для изготовления внешнего контура авиационной техники.

Методы определения горючести, воспламеняемости и распространения пламени по поверхности

Для оценки горючести авиационных материалов используются методы: АП/FAR/CS-25, Приложение F, Части I и VI. В Части I (b) (4), (5) изложены методы определения горючести при воздействии малокалорийного источника огня (имитация горящей спички, сигареты, короткое замыкание электропроводки и т. п.); критерии оценки: скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности образца,

продолжительность самостоятельного горения и длина прогорания для вертикально расположенного образца. Использование этих методов как регламентирующих возможность использования материала на внешнем контуре является явно недостаточным, так как необходимо, чтобы материалы внешнего контура не распространяли пламя по поверхности в более жестких условиях. Метод Части VI оценивает горючесть (продолжительность остаточного горения и длину выгорания) при воздействии внешнего теплового потока и иницирующего пламени. Использование этого метода для оценки материалов внешнего контура представляется более целесообразным, так как характеризует поведение материала (распространение пламени, условия затухания) с учетом воздействия теплового потока.

При проведении исследований перспективных ПКМ специалисты Технического центра FAA США использовали, кроме вышеперечисленных методик, и стандарт ASTM E1321, регламентирующий определение воспламеняемости и распространение пламени вдоль вертикальной поверхности образца в горизонтальном направлении при воздействии внешнего теплового потока. Этот метод, используемый при оценке горючести материалов для судостроения (IMO Res.A.653(16) – ISO 1716:1973), может оказаться перспективным и при оценке горючести материалов композиционного фюзеляжа для широкофюзеляжной авиационной техники.

В качестве дополнения к выбранным методам оценки горючести материалов внешнего контура желательное использование метода определения критического теплового потока, под действием которого происходит воспламенение материала (ГОСТ 30402). Данный метод включен в Нормы пожарной безопасности РФ и применяется при сертификационных испытаниях строительных материалов, широко используется за рубежом при оценке пожаробезопасности материалов различного функционального назначения.

Методы определения огнестойкости

Для оценки огнестойкости авиационных материалов и элементов конструкций используются методы, описанные в АП/FAR/CS-25 (Приложение F, Части I (b) (6) и III), FAR/CS-25 (Часть VII), Aircraft material fire test Handbook (главы 7, 8, 10, 12, 13, 15, 24). Как правило, эти методы предусматривают воздействие пламени мощной керосиновой горелки с температурой 950–1100°C (в зависимости от метода испытаний) и контроль за отсутствием сквозного прогорания (визуально, по температуре воздуха за образцом, величине проходящего теплового потока, сохранению работоспособности). Использование метода оценки огнестойкости для материалов внешнего контура необходимо, так как именно эта характеристика определяет время проникновения огня внутрь фюзеляжа после начала пожара. Представляется целесообразным применение метода, описанного в АП-25 Приложение F, Часть III.

Методы определения количества выделяющегося при горении тепла

Методы определения количества выделяемого тепла позволяют оценивать тепловой баланс и рассчитывать изменение очага пожара. Для этих целей возможно использование как методов определения теплоты сгорания, так и методов измерения кинетических параметров тепловыделения при горении.

Теплота сгорания (ГОСТ 147, ГОСТ 10062, ГОСТ 21261) определяется при помощи бомбового калориметра и показывает потенциальную способность вещества к выделению тепла, но не дает возможности характеризовать интенсивность горения материала в условиях пожара. Для регистрации кинетической кривой интенсивности тепловыделения в процессе горения материала применяются проточные калориметры типа OSU или Cone Calorimeter (ASTM E906, ASTM E1354, ASTM E1474 и др.). Метод определения тепловыделения при горении, включенный в Авиационные правила, использует калориметр типа OSU (АП-25 Приложение F, Часть IV) и позволяет определять кинетическую кривую интенсивности выделения тепла при горении материала под воздействием внешнего теплового потока заданной интенсивности.

На характеристики выделения тепла влияет не только химический состав, но также толщина и структура материала. В работах [21–23] приведено описание математического моделирования процесса тепловыделения при горении и прогнозирование изменения кинетики выделения тепла в зависимости от структуры композиционного материала, вида и толщины теплоотводящей подложки.

Метод определения дымообразующей способности

Для определения интенсивности дымообразования декоративно-отделочных полимерных материалов авиационного назначения в России используется метод по ГОСТ 24632, который аналогичен зарубежному методу ASTM F814 (применяется испытательное оборудование, изготовленное по стандарту ASTM E662). Испытания проводятся в режимах пиролиза и горения, падающий тепловой поток на образец 25 кВт/м^2 . Имеются модификации оборудования, позволяющие проводить испытания при воздействии теплового потока мощностью до 50 кВт/м^2 .

Методы определения токсичности продуктов горения

В настоящее время в Федеральных (государственных) авиационных нормах, как отечественных, так и зарубежных (АП, FAR, CS), отсутствуют требования по оценке токсичности продуктов горения, хотя нормы по ограничению токсичности материалов действуют в большинстве отраслей промышленности (строительство, железнодорожный транспорт, судостроение и др.). Ранее в авиационные требования СССР (Нормы летной годности) в качестве обязательной характеристики было включено определение токсичности продуктов горения полимерных материалов. Эти испытания проводили с использованием живых организмов (лабораторные мыши). Относительно близким к данной процедуре является метод определения токсичности, описанный в ГОСТ 12.1.044 (п. 4.20), где наряду с определением смертельной насыщенности материалов по гибели лабораторных мышей, может производиться и определение концентраций основных токсичных газов.

Нормы, ограничивающие допустимость использования полимерных материалов авиационного назначения в зависимости от концентраций выделяющихся токсичных газов, сейчас введены рядом авиастроительных компаний, например «Boeing», «Airbus», «Bombardier» [24–26]. В соответствии с их нормативными документами производится определение концентраций основных токсичных газов, образующихся при проведении испытаний материалов интерьера на дымообразование. Похожие методики,

различающиеся выбором определяемых газов, допустимых концентраций, процедуре выполнения измерений, используются за рубежом в ряде отраслей промышленности.

В ВИАМ имеется уникальный испытательный комплекс, включающий отечественное и импортное оборудование, по исследованию горючести, огнестойкости, тепловыделения, дымообразующей способности авиационных материалов, а также по определению концентраций токсичных газов по методике, аналогичной используемой фирмой «Airbus». Отсутствующее в ВИАМ оборудование – перспективное для оценки материалов внешнего контура – имеется на ряде других отечественных предприятий (ГосНИИГА, ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», ФГУ ВНИИПО и др.). В настоящее время в ВИАМ накоплен большой объем данных по характеристикам пожарной безопасности различных классов материалов [27], используемых при изготовлении интерьера и отдельных конструктивных узлов отечественных изделий авиационной техники. Данные сведения могут быть использованы при разработке ПКМ, перспективных для изготовления внешнего контура авиационной техники.

Для обеспечения высокой пожарной безопасности создаваемых изделий необходимо выбрать оптимальный по характеристикам материал. При этом перед пользователем стоит сложная задача по сопоставлению множества данных, полученных с использованием нескольких методов испытаний. Разработанные подходы к комплексной оценке характеристик пожарной опасности приведены в работе [28].

При разработке и использовании ПКМ для внешнего контура обязательно следует учитывать их пожароопасные свойства. Именно поэтому работы такой направленности широко проводятся в течение последнего десятилетия за рубежом. Отказ от выполнения данных работ существенно затрудняет задачу создания конкурентоспособных моделей авиационной техники и материалов в части обеспечения пожаробезопасности полетов.

Для обеспечения пожарной безопасности самолета и снижения рисков для пассажиров в случае летных происшествий, связанных с аварийной посадкой и возникновением пожара от разлившегося авиатоплива, к материалам внешнего контура (фюзеляжа, в меньшей степени – крыла, киля и рулевого оперения) необходимо предъявлять следующие требования:

- материалы в течение необходимого времени эвакуации не должны иметь сквозного прогорания и, следовательно, проникновения открытого пламени сквозь обшивку во внутреннюю часть самолета, т. е. внешняя обшивка фюзеляжа должна сохранять целостность, необходимую статическую несущую способность и вместе с внутренней теплозвукоизоляцией достаточную теплоизолирующую способность;

- пламя не должно распространяться (или, в крайнем случае, иметь низкую скорость распространения) по внешней поверхности фюзеляжа в случае его воспламенения, во избежание охвата открытым пламенем всей поверхности самолета и перекрывания возможных путей эвакуации пассажиров и членов экипажа;

- дымообразование и токсичность продуктов горения и термодеструкции (учитывая большую поверхность внешнего контура) обязательно должны нормироваться.

Интенсивность выделения тепла внешними материалами при пожаре снаружи самолета не является критически важной величиной для определения кинетики процесса развития пожара во внутренних отсеках фюзеляжа, а следовательно, слабо влияет на продолжительность сохранения допустимых для выживания тепловых условий. Поэто-

му определение тепловыделения важно для материалов внутренней отделки, но может не входить в перечень обязательных (нормируемых) параметров для материалов внешнего контура, однако для сравнения характеристик различных материалов (как факультативная информация) использование данного метода целесообразно.

В настоящее время назрела необходимость введения в Авиационные правила пункта, обязывающего проводить оценку пожарной безопасности материалов для внешней поверхности транспортных самолетов. В качестве лабораторных методов оценки могут быть использованы следующие методы: горючесть (Части I и VI), огнестойкость (Часть III), дымообразование (Часть V, ГОСТ 24632), определение концентраций токсичных газов. В качестве дополнительных способов оценки желательно использование методов воспламеняемости и тепловыделения. Режимы проведения каждого вида испытаний, критерии оценки и допустимые значения параметров должны быть определены после нахождения коэффициентов подобия и проведения специальных сравнительных (в том числе полномасштабных) испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Decadal Survey of Civil Aeronautics: Foundation for the Future /In.: Steering Committee for the Decadal Survey of Civil Aeronautics, National Research Council. 2006. 212 p.
2. Full-Scale Test Evaluation of Aircraft Fuel Fire Burnthrough Resistance Improvements /DOT/FAA/AR-98/52. 41 p.
3. Sarkos G. Evolution of FAA Fire Safety R&D Over the Years /In.: 5th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
4. Когда горят композиты //Проблемы безопасности полетов. 2010. №4. С. 49–51.
5. Авиационные правила. Глава 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории /Межгосударственный авиационный комитет. 3-е изд. с поправками 1–6. ОАО Авиаиздат. 2009. 274 с.
6. Aircraft Materials Fire Test Handbook /DOT/FAA/AR-00/12. 235 p.
7. Le Neve S. Fire behavior of structural composite materials /In.: 5-th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
8. Ochs R.I. Development of a Lab-Scale Flame Propagation Test for Composite Fuselages /In.: International Aircraft Materials Fire Test Working Group. Atlantic City. 2008.
9. Webster H. In-Flight Burn-Through Tests. Aluminum vs. composite materials /In.: International Aircraft Materials Fire Test Working Group. Atlantic City. 2008.
10. Marker T. Burnthrough Overview /In.: 5th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
11. Flammability Properties of Aircraft Carbon-Fiber Structural Composite /DOT/FAA/AR-07/57. 43 p.
12. A Microscale Combustion Calorimeter /DOT/FAA/AR-01/117. 28 p.
13. Determination of the Heats of Gasification of Polymers Using Differential Scanning Calorimetry /DOT/FAA/AR-TN07/62. 20 p.
14. Development of a Laboratory-Scale Test for Evaluating the Decomposition Products Generated Inside an Intact Fuselage During a Simulated Postcrash Fuel Fire /DOT/FAA/AR-TN07/15. 48 p.
15. Flammability of Polymer Composites /DOT/FAA/AR-08/18. 22 p.
16. Thermo-Kinetic Model of Burning /DOT/FAA/AR-TN08/17. 32 p.
17. Flame Retardant Mechanism of the Nanotubes-based Nanocomposites /NIST GCR 07-912. 65 p.
18. Morgan A.B., Wilkie C.A. Flame retardant polymer nanocomposites /Wiley-Interscience. 2007.
19. Дараева А., Филиппов И. «Боинг-787» под подозрением //Аэронавтика и космос. 2007. №38. С. 24.

20. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials //Springer, Dordrecht, The Netherlands. 2006. 398 p.
21. Барботько С.Л. Моделирование процесса горения материалов при испытаниях по оценке тепловыделения //Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16. №3. С. 10–24.
22. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала путем изменения его структуры //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 27–30.
23. Барботько С.Л. Влияние толщины металлической подложки на кинетику тепловыделения при горении тонкослойных полимерных материалов //Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18. №7. С. 45–50.
24. BSS 7239. Test Method for Toxic Gas Generation by Materials on Combustion //Boeing Specification Support Standard.
25. ABD 0031. Fireworthiness Requirements Pressurized Section of Fuselage.
26. SMP 800-C. Toxic Gas Generation.
27. Барботько С.Л., Воробьев В.Н. Пожаробезопасность авиационных материалов и элементов конструкций: Справочник /Под общей ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2007. 543 с.
28. Барботько С.Л., Голиков Н.И. О комплексной оценке пожарной опасности материалов //Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. №6. С. 16–24.

REFERENCES LIST

1. Decadal Survey of Civil Aeronautics: Foundation for the Future /In.: Steering Committee for the Decadal Survey of Civil Aeronautics, National Research Council. 2006. 212 p.
2. Full-Scale Test Evaluation of Aircraft Fuel Fire Burnthrough Resistance Improvements /DOT/FAA/AR-98/52. 41 p.
3. Sarkos G. Evolution of FAA Fire Safety R&D Over the Years /In.: 5th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
4. Kogda gorjat kompozity [When burning Composites] //Problemy bezopasnosti poletov. 2010. №4. S. 49–51.
5. Aviacionnye pravila. Glava 25. Normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii [Aviation Regulations. Chapter 25. Airworthiness standards transport category airplanes] /Mezhhgosudarstvennyj aviacionnyj komitet. 3-e izd. s popravkami 1–6. OAO Aviaizdat. 2009. 274 s.
6. Aircraft Materials Fire Test Handbook /DOT/FAA/AR-00/12. 235 p.
7. Le Neve S. Fire behavior of structural composite materials /In.: 5-th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
8. Ochs R.I. Development of a Lab-Scale Flame Propagation Test for Composite Fuselages /In.: International Aircraft Materials Fire Test Working Group. Atlantic City. 2008.
9. Webster H. In-Flight Burn-Through Tests. Aluminum vs. composite materials /In.: International Aircraft Materials Fire Test Working Group. Atlantic City. 2008.
10. Marker T. Burnthrough Overview /In.: 5th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. Atlantic City. 2007.
11. Flammability Properties of Aircraft Carbon-Fiber Structural Composite /DOT/FAA/AR-07/57. 43 p.
12. A Microscale Combustion Calorimeter /DOT/FAA/AR-01/117. 28 p.
13. Determination of the Heats of Gasification of Polymers Using Differential Scanning Calorimetry /DOT/FAA/AR-TN07/62. 20 p.
14. Development of a Laboratory-Scale Test for Evaluating the Decomposition Products Generated Inside an Intact Fuselage During a Simulated Postcrash Fuel Fire /DOT/FAA/AR-TN07/15. 48 p.
15. Flammability of Polymer Composites /DOT/FAA/AR-08/18. 22 p.
16. Thermo-Kinetic Model of Burning /DOT/FAA/AR-TN08/17. 32 p.
17. Flame Retardant Mechanism of the Nanotubes-based Nanocomposites /NIST GCR 07-912. 65 p.

18. Morgan A.B., Wilkie C.A. Flame retardant polymer nanocomposites /Wiley-Interscience. 2007.
19. Dagaeva A., Filippov I. «Boing-787» pod podozreniem ["Boeing-787" under suspicion] //Ajeronavtika i kosmos. 2007. №38. S. 24.
20. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials //Springer, Dordrecht, The Netherlands. 2006. 398 p.
21. Barbot'ko S.L. Modelirovanie processa gorenija materialov pri ispytaniyah po ocenke teplovydelenija [Simulation of combustion materials in tests to assess heat release] //Pozharovzryvobezопасnost'. 2007. T. 16. №3. S. 10–24.
22. Shurkova E.N., Vol'nyj O.S., Izotova T.F., Barbot'ko S.L. Issledovanie vozmozhnosti snizhenija teplovydelenija pri gorenii kompozicionnogo materiala putem izmenenija ego struktury [Feasibility study for reducing the combustion heat of the composite material by modifying its structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 27–30.
23. Barbot'ko S.L. Vlijanie tolshhiny metallicheskoj podlozhki na kinetiku teplovydelenija pri gorenii tonkoslojnyh polimernyh materialov [Effect of the thickness of the metal substrate on the kinetics of heat during the combustion thin plastics] //Pozharovzryvobezопасnost'. 2009. T. 18. №7. S. 45–50.
24. BSS 7239. Test Method for Toxic Gas Generation by Materials on Combustion //Boeing Specification Support Standard.
25. ABD 0031. Fireworthiness Requirements Pressurized Section of Fuselage.
26. SMP 800-C. Toxic Gas Generation.
27. Barbot'ko S.L., Vorob'ev V.N. Pozharobezопасnost' aviacionnyh materialov i jelementov konstrukcij [Fire safety of aircraft materials and components]: Spravochnik /Pod obshej red. E.N. Kablova. M.: VIAM. 2007. 543 s.
28. Barbot'ko S.L., Golikov N.I. O kompleksnoj ocenke pozharnoj opasnosti materialov [About a comprehensive assessment of fire hazard materials] //Pozharovzryvobezопасnost'. 2008. T. 17. №6. S. 16–24.