

УДК 620.1:699.81

С.Л. Барботько¹

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526

Одними из важнейших свойств материалов являются характеристики пожарной безопасности. Увеличение применения полимерных материалов в конструкциях изделий авиационной техники требует совершенствования нормативной базы на проведение испытаний. В статье проведен анализ существующих требований по пожарной безопасности и приведено описание работ, выполненных во ФГУП «ВИАМ» в последние годы, по совершенствованию нормативной базы на проведение испытаний.

Ключевые слова: *пожарная безопасность, методы испытаний, огнестойкость, горючесть, тепловыделение.*

S.L. Barbotko

Development of the fire safety test methods for aviation materials

One of the most important properties of materials are characteristics of fire safety. The increase in application of polymeric materials in aerostructures requires improvement of testing regulations. In article the analysis of existing requirements for fire safety is carried out and description of works executed in VIAM on improvement of testing regulations in recent years is provided.

Keywords: *fire safety, test methods, fire resistant, flammability, heat release.*

Россия – часть глобального мира, а глобализация мировой экономики означает возрастание роли транспорта вследствие увеличения количества пассажиро- и грузопотоков. Одной из основных составляющих транспорта является авиация, обеспечивающая быстрое перемещение людей и грузов на большие расстояния.

Одними из важнейших требований, предъявляемых к авиационной технике, наряду с надежностью, безотказностью и экономичностью, являются высокие характеристики безопасности. Одной из составляющих характеристик безопасности является пожарная безопасность, в том числе обеспечение:

- низкой вероятности возникновения очага пожара;
- предотвращение развития пожара;

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

– минимизация нанесения материального ущерба и гибели людей.

Для обеспечения возможности осуществления больших пассажиро- и грузопотоков создаются широкофюзеляжные самолеты высокой грузо- и пассажировместимости. В ближайшие годы планируется разработка самолетов, имеющих пассажировместимость свыше 1000 человек. Для реализации конкурентоспособности техники одновременно необходимо обеспечить и экономичность при эксплуатации. Высокая экономичность может быть достигнута и за счет удельного снижения массы техники в пересчете на 1 кг перевозимого груза или 1 пассажира. Этот параметр может быть достигнут при переходе от использования в конструкциях металлов и сплавов к полимерным композиционным материалам, имеющим более низкую удельную массу и более высокие механические характеристики [1–3]. Применение конструкционных полимерных материалов из-за отсутствия коррозии способствует и обеспечению длительных сроков эксплуатации авиационной техники. Однако полимерные материалы в той или иной мере являются пожароопасными.

Создание самолетов высокой пассажировместимости требует решения вопроса по успешной эвакуации людей в случае летных происшествий как с точки зрения обеспечения одновременной многопотоковости путей экстренной эвакуации, так и повышения стойкости материалов к воздействию огня.

Наиболее опасными для авиационной техники и пассажиров являются пожары, связанные с возгоранием аккумуляторных батарей во время полета, и наземные пожары от разлившегося топлива [4–7]. Именно возникновение внешнего высокоинтенсивного пожара от разлившегося углеводородного топлива может перевести авиационное происшествие без гибели людей в тяжелую авиационную катастрофу. Одним из недавних свидетельств этому является авиакатастрофа близ аэропорта г. Петрозаводска.

Для решения этих задач в авиационные нормы включены требования по пожарной безопасности к материалам, узлам, отсекам и элементам конструкций [8–10].

В авиационных нормах имеется ряд параграфов, описывающих требования по пожарной безопасности. Прежде всего это требования к материалам интерьера пассажирской кабины и прилегающих мест, багажно-грузовому отсеку и пожароопасным зонам (основные и вспомогательные двигательные установки; подогреватели, работающие на топливе; топливные и масляные баки; топливопроводы; зоны действия горячего выхлопа). Отдельно предъявляются требования по пожарной безопасности к матам тепловой и акустической изоляции.

В настоящее время требований к пожарной безопасности внешнего контура авиационной техники не предъявляются. Это объясняется тем,

что в подавляющем большинстве случаев внешний контур авиационной техники до последнего времени изготавливался из алюминиевых сплавов, которые хотя и обладают низкой огнестойкостью, но обычно в условиях стандартных пожаров не горят и пламя по своей поверхности не распространяют. Низкая огнестойкость алюминиевых сплавов приводит к тому, что под действием высоких температур и пламени происходит быстрое разрушение внешней обшивки самолета (через 30–90 с) и проникновение пламени во внутренние отсеки. Поэтому Федеральным авиационным агентством США к 2015 г. было запланировано создание огнестойкого фюзеляжа, что повлечет за собой и введение в авиационные нормы соответствующих требований по пожарной безопасности.

Методы проведения огневых испытаний декоративно-отделочных материалов интерьера, багажно-грузовых отсеков и матов тепловой/акустической изоляции приведены в Приложении F авиационных норм [8–10]. В тексте авиационных норм (отечественные Авиационные правила (АП), зарубежные FAR и CS) применительно к пожаро-опасным зонам сказано, что материалы и конструктивные элементы должны быть огнестойкими или огнестойкими, однако непосредственно сами методы испытаний в тексте норм не приведены. Подразумевается, что эти методы должны быть описаны в отдельных документах (Методы определения соответствия, Рекомендательные циркуляры, Технические стандартные процедуры). Такие документы имеются за рубежом, например стандарты [11, 12], но отсутствуют в России. В результате в отечественной нормативной базе имеется пробел, усложняющий процесс сертификации отечественных изделий авиационного назначения.

В ВИАМ огневыми испытаниями материалов для определения характеристик пожарной опасности начали заниматься с 1970 г. [13]. В XX в. и первом десятилетии XXI в. оценке пожарной безопасности подвергались преимущественно декоративно-отделочные материалы. Однако расширение области применения полимерных материалов вносит свои коррективы, и в последние годы доля испытаний конструктивных материалов постоянно растет. Исторически сложилось так, что ВИАМ отвечал только за материалы, а не за конструктивные элементы, узлы и изделия. Но огнестойкость материала (способность сохранять работоспособность в условиях воздействия открытого пламени и повышенной температуры при пожаре, не пропускать сквозь себя открытое пламя и ограничивать тепловой поток) определяется не столько отдельным материалом, сколько конструктивным элементом, сочетающим ряд материалов. Подтверждение правильности примененных решений подтверждалось полумасштабными и натурными огневыми испытаниями. Однако за конструктивные элементы, узлы и изделия несли ответственность ОКБ отрасли.

В настоящее время огневая испытательная база для определения характеристик пожарной безопасности в соответствии с требованиями авиационных норм, кроме Испытательного центра ФГУП «ВИАМ», имеется еще всего в 2–3 организациях. При этом возможности оборудования различных испытательных лабораторий, как правило, не дублируют, а взаимно дополняют друг друга. В большинстве КБ и на предприятиях отрасли возможности по проведению огневых испытаний отсутствуют.

Во ФГУП «ВИАМ» в 2011 г. были приняты «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», определившие основные вехи создания новых материалов и методов их испытаний [1]. В рамках реализации направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов и неразрушающий контроль», раздел 2.2. «Квалификация и исследования материалов» предусматривается развитие методов проведения испытаний на пожаробезопасность.

С учетом тенденций развития применения полимерных материалов и зарубежных сведений об используемых методах и методиках проведения огневых испытаний, а также программы реорганизации структуры авиационных норм в части требований по пожарной безопасности, в последние годы приоритет был отдан совершенствованию экспериментальной и методической базы по проведению испытаний на огнестойкость, воспламеняемость и распространение пламени по поверхности конструкционных и функциональных материалов [13–16].

Применяемые в авиационной отрасли методы оценки огнестойкости и огнестойкости материалов зависят как от функционального назначения материала (конструкции), так и от страны, производящей сертификацию авиационной техники. Однако в своем подавляющем большинстве это методы испытаний именно элементов конструкций, подразумевающие проведение масштабных огневых полигонных испытаний для целей сертификации. На этапе разработки материала требуются гораздо более многочисленные лабораторные испытания, причем на сравнительно небольших образцах. По результатам этих испытаний производится выбор наиболее перспективных композиций (составов, структур), с определенной вероятностью способных обеспечить требования к конструкциям при проведении полномасштабных испытаний. Соответственно требуется разработка необходимой нормативной базы на проведение лабораторных испытаний.

В течение последних лет во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд стандартов организации, направленных на решение этих задач.

В связи с ростом применения в различных отраслях промышленности и в быту полимерных материалов, поставлена задача по развитию

нормативной базы по испытаниям полимерных композиционных материалов. Это касается и повышения их пожарной безопасности, поэтому потребовалась разработка ряда государственных стандартов по методам определения характеристик пожарной безопасности. В 2016 г. первый этап решения этой задачи выполнен и разработаны три проекта ГОСТ Р, которые в настоящее время находятся в стадии утверждения.

Первый проект ГОСТ Р касается метода определения горючести полимерных материалов авиационного назначения и описывает комплекс методик для испытаний материалов различного функционального назначения, в том числе и электрических проводов. Этот стандарт позволяет определять способность материалов воспламеняться, распространять пламя по поверхности, затухать при прекращении действия источника воспламенения, образовывать горящие капли.

Следующий проект ГОСТ Р описывает метод определения тепловыделения при горении материалов под воздействием внешнего теплового потока заданной интенсивности. Определение важных характеристик тепловыделения при горении (интенсивность выделения тепла в каждый момент времени, общее количество выделившегося тепла, максимальная интенсивность тепловыделения, время наступления максимума тепловыделения и др.) позволяет прогнозировать изменение очага пожара, предсказывать время наступления критических условий для выживания – предельная температура выживания, время наступления всеобщей вспышки. Для проведения испытаний по определению данных показателей используют проточный калориметр типа OSU, работающий по термопарному методу. В отличие от получившего распространение в последние годы конусного калориметра, работающего по принципу измерения количества потребленного кислорода, этот метод лишен ряда недостатков и позволяет более адекватно оценивать влияние различных типов антипиренов, в том числе работающих по принципам разложения с большим эндотермическим эффектом и разбавления продуктов термодеструкции полимерных материалов парогазовыми инертными продуктами (углекислый газ, пары воды).

Еще одной важной проблемой, связанной с применением полимерных материалов, является их способность изменять свои характеристики вследствие внешних воздействующих климатических и эксплуатационных факторов [17–19]. К этим характеристикам, наряду с физико-механическими свойствами, относятся и характеристики пожарной безопасности [20, 21]. Для обеспечения возможности оценки сохраняемости характеристик пожарной безопасности при воздействии факторов внешней среды разработан стандарт организации СТО 1-595-20-486–2015. На основе этого стандарта организации также разработан проект государственного стандарта.

В связи с полным запретом на курение в салоне самолета во время полета, количество летных происшествий, связанных с возникновением возгораний на борту, значительно сократилось и их основной причиной стали не горящие спички и сигареты, а перегревы в электропроводке и аккумуляторах, приводящие к воспламенению контактирующих с ними материалов. Эти элементы относятся к скрытым, и во время полета, как правило, невозможен их визуальный контроль и доступ к ним затруднен. Поэтому необходимо, чтобы контактирующие с возможными источниками воспламенения материалы (конструктивные элементы) либо не воспламенялись, либо, как минимум, пламя не распространялось на значительные расстояния и быстро гасло при прекращении действия источника воспламенения. В подавляющем большинстве этими контактирующими элементами являются маты тепловой/акустической изоляции, предназначенные для обеспечения комфортных условий в пассажирском салоне во время полета.

Метод квалификационных испытаний матов тепловой/акустической изоляции изложен в части VI Приложения F авиационных норм (АП-25, FAR-25, CS-25) [8–10]. Согласно требованиям необходимо, чтобы при действии на образец испытываемого теплоизоляционного мата теплового потока мощностью 17 кВт/м^2 после прекращения воздействия источника воспламенения (пламя газовой горелки) пламя распространялось по поверхности образца не более чем на 50 мм и гасло в течение не более 3 с. Реализация этого метода испытаний на имеющемся в институте оборудовании изложена в стандарте организации СТО 1-595-20-429–2013. Этот метод испытаний для выполнения квалификации требует использования не менее трех образцов размерами 318×584 мм каждый. Однако для проведения предварительных поисковых испытаний возможно применение образцов с меньшими размерами (275×275 мм). Применение таких уменьшенных образцов позволяет получить адекватные результаты, но более чем в 3 раза снизить расходы на изготовление образцов. Проведенные испытания показали, что для обеспечения соответствия этим нормам пожарной безопасности недопустимо применение теплозвукоизоляционных матов на основе нетермостойких синтетических или натуральных волокон и изоляционной пленки на основе поливинилхлорида [15].

Как уже отмечалось, наиболее сложными для обеспечения выживаемости являются авиационные происшествия, связанные с возникновением внешнего пожара от разлившегося топлива. Проблема обеспечения выживаемости людей и сохранности перевозимых грузов при таких пожарах требует повышения огнестойкости наружных конструктивных элементов самолета. Задача обеспечения огнестойкости наружного контура самолета от внешнего пожара может быть решена либо путем

применения высокоэффективной огнестойкой изоляции, либо повышением огнестойкости непосредственно внешней обшивки фюзеляжа.

Согласно требованиям авиационных норм [8–10] (п. 25.856b) необходимо проводить испытания на огнестойкость матов, используемых для тепловой/акустической изоляции нижней части фюзеляжа согласно методу, изложенному в части VII Приложения F авиационных норм. Для квалификационных испытаний требуется специальное оборудование – керосиновая горелка с расходом топлива 7 галлонов в час и стенд для крепления теплоизоляционных матов. При испытаниях должен использоваться комплект, состоящий из двух образцов, каждый размерами 914×813 мм. Понятно, что такие испытания не могут быть проведены в лабораторных помещениях и требуют очень больших расходов на изготовление образцов. Данное испытательное оборудование в настоящее время в России отсутствует. Поэтому для возможности отработки состава и технологии разработана методика проведения маломасштабных испытаний, изложенная в методическом материале ММ1.595-20-412–2010. При проведении лабораторных испытаний по этой методике используются образцы размерами всего 200×200 мм.

Проблема повышения огнестойкости внешней обшивки фюзеляжа может быть решена путем замены сравнительно легкоплавких алюминиевых сплавов на другие материалы, которые в процессе воздействия пожара не допустят проникновения открытого пламени во внутренние отсеки. Этими материалами, наряду с титановыми сплавами и сталями, могут быть полимерные композиционные материалы и гибридные металл-полимерные материалы. В случае применения полимерных композиционных материалов необходимо решить еще одну задачу – предотвратить распространение пламени по всей поверхности конструкции, чтобы обеспечить возможность эвакуации людей из авиационной техники через выходы, находящиеся вне зоны пожара. Однако даже вне зоны воздействия пламени на близлежащие поверхности воздействует тепловой поток от пламени, который постепенно уменьшается по мере удаления от очага пожара. Считается, что люди способны кратковременно выдержать воздействие теплового потока интенсивностью до 17 кВт/м². При этом в тепловом потоке остаются работоспособными аварийные средства эвакуации. Соответственно необходимо, чтобы при данном тепловом потоке не происходило распространения пламени по поверхности обшивки фюзеляжа и охвата пламенем аварийных выходов. Для оценки способности авиационных материалов распространять пламя по поверхности при воздействии теплового потока и гаснуть при его снижении ниже критической величины разработан стандарт организации СТО 1-595-20-447–2014. С использованием этого документа начаты исследования по

влиянию химического состава полимерного связующего, наполнителя, толщины материала, наличия и вида покрытий на регистрируемые характеристики [16].

Имеющаяся в Испытательном центре ФГУП «ВИАМ» испытательная база обеспечивает возможность проведения как исследовательских, так и квалификационных испытаний материалов на горючесть (в соответствии с методом, изложенным в части I Приложения F Авиационных правил), тепловыделение (метод изложен в части IV Приложения F Авиационных правил), дымообразование (согласно требованиям Авиационных правил испытания проводятся по ГОСТ 24632), воспламеняемость материалов тепловой/акустической изоляции и распространение пламени по ним (часть VI Приложения F Авиационных правил), а также на герметичность материалов спасательных трапов (испытания согласно техническому стандарту TSO C69 п. 5.3). Кроме этого комплекса оборудования для выполнения квалификационных работ по испытаниям материалов, в ИЦ ФГУП «ВИАМ» имеется оборудование, обеспечивающее выполнение исследовательских работ для материалов авиационного назначения и квалификационных испытаний для материалов некоторых других отраслей промышленности. Среди этого оборудования – адиабатический бомбовый калориметр, обеспечивающий определение высшей и низшей теплоты сгорания полимерных материалов, твердых и жидких топлив, а также прибор кислородного индекса, предназначенный для определения предельных условий горения материалов по величине концентрации кислорода в атмосфере.

Определение теплоты сгорания полимерных материалов является необходимой процедурой согласно требованиям морского и речного регистров. В 2014 г. в России вышел государственный стандарт ГОСТ Р 56025–2014 по определению теплоты сгорания строительных материалов. За рубежом работы с применением бомбового калориметра проводятся и для материалов авиационного назначения [22, 23]. Ожидается, что этот метод испытаний может быть введен в качестве дополнительного метода при квалификационных испытаниях авиационных материалов и будет востребован для получения одобрения на сертификат типа новой авиационной техники.

Как уже упоминалось ранее, для ряда материалов, расположенных в пожароопасных зонах, требуются отдельные специальные квалификационные испытания на огнестойкость. За рубежом для этих целей используется комплекс методик испытаний, основанный на нескольких типах оборудования. Ранее в СССР эти испытания проводились в соответствии с Нормами летной годности гражданских самолетов СССР (НЛГС-2 и НЛГС-3). При проведении испытаний использовали газовую

или керосиновую горелку с диаметром факела 120 мм, обеспечивающую температуру в центре пламени 1100°С. Но описанная в Методе определения соответствия процедура проведения испытаний на огнестойкость и применяемое оборудование отличались от используемых за рубежом. В последнее десятилетие XX в. в России перешли на новые, гармонизированные с зарубежными, Авиационные правила. Соответственно потребовалась актуализация и разработка новых нормативных документов по методикам проведения испытаний и подтверждения соответствия требованиям авиационных норм. Такая работа по ряду документов была выполнена Авиационным регистром Международного авиационного комитета. Но в настоящее время в Российской Федерации фактически отсутствует экспериментальная и государственная нормативная база для проведения испытаний на огнестойкость и огнестойкость для показа соответствия требованиям современных, действующих Авиационных правил, вследствие чего квалификационные испытания конструктивных элементов, расположенных в пожароопасных зонах авиационной техники, или ограничивающих их огнепреграждающих перегородок в России проводиться не могут. В связи с этим испытания для обеспечения сертификации авиационной техники по этим характеристикам авиастроительные компании вынуждены проводить за рубежом. Поэтому на ближайшие годы в авиационной отрасли стоит задача по развитию как экспериментальной, так и нормативной базы, обеспечивающей возможность выполнения этих работ. Решение этой задачи позволит успешно достичь цели по созданию современной отечественной авиационной техники, конкурентоспособной с зарубежной и обеспечивающей ее импортозамещение на внутреннем рынке и широкий экспорт на внешний рынок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
4. Cherry R.G.W. Thermal Acoustic Insulation Contamination Research // Technical Report DOT/FAA/TC-14/24. U.S. Department of Transportation

- Federal Aviation Administration Transport Airplane Directorate, ANM-115. 2014. 114 p.
5. Ochs R.I. Evaluation of Carbon Fiber Composite Flammability: Effect of Sample Thickness and External Ambient Conditions on Inboard Surface Flame Propagation // Technical Report DOT/FAA/TC-TN15/1. U.S. Department of Transportation William J. Hughes Technical Center, 2015. 29 p.
 6. Quintiere J.G., Crowley S., Walters R.N., Lyon R.E., Blake D. Fire Hazards of Lithium Batteries // Technical Report DOT/FAA/TC-TN15/17. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, 2016. 50 p.
 7. Barnett B., Ofer D., Sriramulu S., Stringfellow R. Lithium-Ion Batteries // Safety in Batteries for Sustainability. New York: Springer, 2013. P. 285–318.
 8. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25. 3-е изд., с поправками 1–7: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. М.: Авиаиздат, 2014. 278 с.
 9. Federal Register. 14 CFR Part 25 – Airworthiness standards. Transport category airplanes // Federal Aviation Administration. URL: http://www.faa.gov/regulations_policies/faa_regulations (дата обращения: 07.11.2016).
 10. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS–25. Amendment 15. European Aviation Safety Agency, 2014. 921 p.
 11. Advisory Circular AC 20-135 Powerplant installation and propulsion system component fire protection test methods, standards, and criteria. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, 1990. 18 p.
 12. Technical Standard Order TSO-C69c. Emergency evacuation slides, ramps, ramp/slides, and slide/rafts. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1999. 47 p.
 13. Барботько С.Л. Пожаробезопасность авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 431–439.
 14. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 56–63.
 15. Кириенко О.А., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Барботько С.Л. Исследование влияния различных защитных покрытий на характеристики пожарной безопасности тепловой акустической изоляции фюзеляжа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-7-7.
 16. Кириенко О.А., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Барботько С.Л. Оценка пожарной безопасности ПКМ при распространении

- пламени по горизонтальной поверхности в условиях теплового потока переменной интенсивности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-11-11.
17. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2016).
 18. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2013. №1. С. 37–41.
 19. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
 20. Скрылев Н.С., Вольный О.С., Постнов В.И., Барботько С.Л. Исследование влияния тепловых факторов климата на изменение характеристик пожаробезопасности полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2016).
 21. Скрылев Н.С., Вольный О.С., Абрамов Д.В., Шуркова Е.Н. Исследование влияния тепловлажностных факторов на изменение характеристик пожарной безопасности ПКМ, подверженных климатическим воздействиям // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-12-12.
 22. Lyon R.E. Thermal Dynamics of Bomb Calorimeters // Technical Report DOT/FAA/TC-TN16/16. Federal Aviation Administration Technical Centre, 2016. 20 p.
 23. Walters R.N., Lyon R.E. Measuring Energy Release of Lithium-ion Battery Failure Using a Bomb Calorimeter // Technical Report DOT/FAA/TC-15/40. Aviation Research Division Federal Aviation Administration Technical Center, 2016. 20 p.