

УДК 699.81:66.018.4

С.Л. Барботько¹, О.С. Вольный¹, О.А. Кириенко¹, Е.Н. Шуркова¹**ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-12-12

Одними из важнейших характеристик в обеспечение пожаробезопасности авиационной техники являются огнестойкость и огнестойкость материалов и конструктивных элементов на их основе. Характеристики огнестойкости (кроме тепло- и термостойкости материала огнеблокирующей перегородки) определяются также величиной передаваемого теплового потока и температурой необогреваемой поверхности. Поскольку на эти характеристики влияют как свойства самого испытываемого материала, так и условия проведения испытания, требуется разработка математической модели, позволяющей оценивать влияние различных факторов на нормируемые характеристики. Построена математическая модель, описывающая теплопередачу от пламени на монолитную стенку и от стенки в окружающее пространство. Выполнены оценочные расчеты по влиянию различных факторов материала и условий окружающей среды на температурные характеристики образца огнепреграждающей перегородки.

Ключевые слова: огнестойкость, огнестойкость, пожарная безопасность, математическая модель, огневые испытания, авиационная техника, теплоперенос.

One of the major characteristics in ensuring fire safety of aviation engineering are fire resistance and fireproof of materials and constructive elements on their basis. Fire resistance characteristics, except the thermal stability of material of fireproof partition are defined also by the size of transmitted heat flux and temperature of not warmed surface. On these characteristics are influence as properties of the tested material, and condition of carrying out testing, therefore development of mathematical model allowing to evaluate influence of different factors on normed characteristics is required. The mathematical model describing heat transfer from flame on monolithic wall and from wall in surrounding space is constructed. Calculation for influence the different factors of material and environmental conditions on specimen fireproof partition temperature are executed.

Keywords: fire resistance, fireproof, fire safety, mathematical model, fire tests, aviation technique.

¹Федеральное 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

Введение

Одними из важнейших характеристик при обеспечении пожаробезопасности авиационной техники являются огнестойкость и огнестойкость материалов и конструктивных элементов на их основе. Требования к огнестойкости и огнестойкости изложены в большом количестве параграфов авиационных норм – например: 25.854, 25.859, 25.863, 25.865, 25.867, 25.869, 25.1181, 25.1182, 25.1183, 25.1185, 25.1187, 25.1189, 25.1191, 25.1193, 25.1201 Авиационных правил АП-25 [1], 3.17 АП-33 [2]. Аналогичные параграфы есть и в авиационных правилах для других категорий авиационной техники (АП-23, АП-27, АП-27, АП-ОЛС, АП-ВД и др.).

Методы оценки пожарной безопасности материалов авиационного назначения и конструктивных элементов на их основе описаны в ряде работ – например, в работах [3, 4]. Методы оценки полимерных композиционных материалов (ПКМ), предназначенных для изготовления внешнего контура авиационной техники, проанализированы в работе [5].

Анализ методик испытаний на огнестойкость выполнен в работе [6]. Однако в отличие от методов оценки пожаробезопасности материалов внутренней отделки (отделка пассажирского салона и кабины пилотов, багажно-грузовые отсеки, тепловая и акустическая изоляция) методы оценки огнестойкости и огнестойкости в тексте авиационных норм не прописаны, а также не дана ссылка на используемые стандарты для проведения испытаний. Максимум, что имеется в тексте авиационных норм – указание на температуру пламени и продолжительность испытаний. За рубежом процедуры и используемая аппаратура для проведения испытаний на пожаробезопасность прописаны в различных вспомогательных документах, например – в Рекомендательных циркулярах (*Advisory Circular*), Методах определения соответствия (*Acceptable Means of Compliance*), Стандартных технических порядках (*Technical Standard Order*), технических отчетах, стандартах различных организаций, например документы [7–9]. Обобщенная информация по методам оценки пожарной безопасности материалов и конструктивных элементов приведена в справочнике по методам огневых испытаний авиационных материалов [10].

Материалы и методы

В последние годы в ВИАМ разработан комплекс полимерных конструкционных материалов и технологий, предназначенных для изготовления элементов внешнего контура авиационной техники и внутренней отделки [11–16]. Материалы прошли комплекс испытаний, в том числе по оценке характеристик пожарной безопасности [17–21]. Однако этих данных может оказаться недостаточно для оценки поведения материалов в возможных экстремальных условиях эксплуатации – например при пожаре.

При проектировании изделий необходимо знать (хотя бы оценочно) ожидаемые характеристики огнестойкости, в первую очередь – это оценка способности материала выдерживать воздействие пламени, а также величина температуры на необогреваемой стороне. Однако эти характеристики меняются в зависимости от различных условий (ориентация материала в пространстве, условия теплопередачи, коэффициенты черноты поверхности, излучательная способность пламени и др.), а также от изменения структуры композиционного материала [22]. Проведение испытаний для всех возможных (ожидаемых) условий, материалов и их комбинаций очень материало- и трудоемко. Поэтому желательно иметь математический аппарат, позволяющий оценивать влияние различных факторов на регистрируемые температурные характеристики материала (конструктивного элемента) в условиях воздействия открытого пламени.

Данная работа посвящена расчетной оценке влияния различных факторов (теплофизические свойства материала, толщина, условия теплообмена, комбинации материалов) на ожидаемые температурные характеристики. Работа выполнена в рамках реализации направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов и неразрушающий контроль», раздел 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [23–25].

*Метод построения математической модели
по теплопередаче через плоский образец*

Построение математической модели температур поверхности материала, подвергаемого воздействию открытого пламени (имитация испытаний на огнестойкость и огнестойкость), осуществлено на основе теплового баланса при теплопередаче от пламени к монолитной поверхности (стенка), теплопередаче через нее и теплоотдаче от нагретой стенки в окружающее пространство.

В авиационной технике нечасто встречаются плоские поверхности, однако когда радиус кривизны многократно превышает толщину стенки, все расчеты могут быть выполнены для условий теплопередачи через плоскую стенку.

Оценим количество тепла (тепловой поток) и температуры поверхностей для плоского листа материала, подвергаемого воздействию пламени с одной стороны.

Тепловой поток ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в общем случае описывается уравнением:

$$q = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; ΔT – разность температур, К.

Поскольку ожидаемый уровень температур достаточно высок ($>100^\circ\text{C}$), то теплопередача как к материалу от пламени, так и от него в окружающую среду будет осуществляться конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением. Теплопередача через сплошную непрозрачную стенку будет осуществляться только за счет теплопроводности. Конвективная теплопередача может осуществляться под действием как естественной, так и вынужденной конвекции.

Коэффициенты теплообмена α могут быть определены из критерия Нуссельта:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (2)$$

где l – определяющий размер, м; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Величина критерия Нуссельта для условий вынужденной конвекции при течении потока вдоль плоской поверхности рассчитывается по следующим критериальным уравнениям [26]:

– для $\text{Re} < 5 \cdot 10^5$

$$\text{Nu} = 0,66 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}; \quad (3)$$

– для $\text{Re} > 5 \cdot 10^5$

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

– для газов формула (4) может быть сведена к виду

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot \text{Re}^{0,8}, \quad (5)$$

где Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Критерий Рейнольдса рассчитывается по уравнению:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot l \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot l}{\nu}, \quad (6)$$

где ω – скорость потока вдоль поверхности, м/с; l – определяющий размер (в данном случае – длина поверхности, вдоль которой движется поток), м; ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Величина критерия Прандтля для газов считается приблизительно постоянной, так как мало зависит от температуры [26]. Для воздуха (двухатомный газ) она может быть принята равной 0,72 [26], для дымовых газов 0,57 [27].

Считается, что тепловые условия для теплопередачи при вынужденной конвекции практически не зависят от ориентации поверхности в пространстве [26, 27].

Теплопередача в условиях свободной конвекции для вертикальных поверхностей (плоские или цилиндрические) рассчитывается по критериальным уравнениям:

– при $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$

$$Nu = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}; \quad (7)$$

– при $Gr \cdot Pr > 10^9$

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где Gr – критерий Грасгоффа.

Критерий Грасгоффа описывается уравнением:

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \frac{\Delta T \cdot l^3}{\nu^2}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$; β – объемный температурный коэффициент расширения, для газов – $\beta = 1/T$.

Для воздуха и дымовых газов при температурах до 1500°C величина критерия $(Gr \cdot Pr) < 10^9$, поэтому при расчете критерия Нуссельта используется формула (7).

Для условий естественной конвекции, согласно работе [27], для горизонтальных плит расчеты ориентировочно могут быть выполнены по формулам для вертикальных поверхностей, но если теплоотдающая поверхность обращена вверх, то величина коэффициента теплоотдачи увеличивается на 30%, а если вниз – уменьшается на 30%.

Интенсивность теплопередачи за счет излучения (теплоотдача от нагретой поверхности в окружающее пространство) описывается уравнением:

$$q_{л} = C_{1-2} \cdot \Phi \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

где $C_{1-2} = C_{ч} \cdot \varepsilon_{пр}$ – эффективный или результирующий (приведенный) коэффициент излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; Φ – угловой коэффициент (безразмерный); $C_{ч} = \sigma_{с-б} \cdot 10^8 = 5,67$ – коэффициент излучательной способности абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; $\sigma_{с-б} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Поскольку излучающее тело находится внутри, то угловой коэффициент $\Phi = 1,0$; так как площадь окружающего пространства значительно больше площади поверхности излучающего тела, то:

$$C_{1-2} = C_1 = C_{ч} \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

где ε – коэффициент черноты поверхности материала.

Передача тепла излучением от пламени. Основной вклад в излучение осуществляется трехатомными газами (углекислый газ, пары воды) и сажевыми частицами. Излучательная способность пламени зависит от длины молекулы, химического состава и строения молекулы топлива. Излучательная способность возрастает с увеличением количества атомов углерода в молекуле и уменьшением доли водорода. В условиях не коптящего пламени основное излучение будет создаваться молекулами воды и

углекислого газа. При наличии в пламени частиц сажи, углеводородов, пылевых частиц возникает дополнительное лучеиспускание, которое может рассматриваться как излучение абсолютно черного тела при диаметре факела, более 1–2 м [28, 29].

Тепловое излучение газов непосредственно не подчиняется закону Стефана–Больцмана, но в основу расчетов по лучистой теплопередаче от газов может быть положен закон Стефана–Больцмана с внесением поправок в рассчитываемый коэффициент излучательной способности (черноты) газов. Излучательная способность пропорциональна произведению парциального давления газа на толщину излучающего слоя (среднюю длину пути луча). Тепловой поток от газов за счет излучения может быть рассчитан по уравнениям, приведенным в работах [29, 30], но удобнее использовать номограммы для коэффициентов черноты газов, приведенные, например, в работах [27, 29, 30].

Суммарная степень излучательной способности (черноты) газов рассчитывается по уравнению:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (12)$$

где β – поправочный коэффициент.

Тогда тепловой поток от пламени на поверхность может быть описан уравнением:

$$q_{\text{пламя}} = C_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{пламя}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{стенки}}}{100} \right)^4 \right], \quad (13)$$

где C_{1-2} – эффективный или результирующий (приведенный) коэффициент передачи, Вт/(м²·К⁴), рассчитываемый по формуле

$$C_{1-2} = \frac{C_{\text{ч}}}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (14)$$

где ε_1 и ε_2 – коэффициенты излучательной способности газа (пламени) и черноты воспринимающего материала (стенки).

Расчет теплопередачи через материал (плоская стенка). Теплопередача через однослойную плоскую стенку (установившийся режим) описывается формулой:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_{\Gamma} - t_{\text{х}}}{r} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{х}}), \quad (15)$$

где q – удельный тепловой поток, Вт/м²; Q – тепловой поток, Вт; F – площадь поверхности стенки, м²; t_{Γ} и $t_{\text{х}}$ – температуры горячей и холодной поверхности стенки, К или °С; $r = \delta/\lambda$ – термическое сопротивление стенки, (м²·К)/Вт; δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Для многослойной стенки это уравнение принимает вид:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_{\Gamma} - t_{\text{х}}}{\sum r} = \frac{t_{\Gamma} - t_{\text{х}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots}, \quad (16)$$

Для установившихся тепловых условий (стационарный процесс теплопередачи в одномерном приближении), из условий неразрывности (сохранения) теплового баланса, тепловые потоки от пламени на материал, теплопередача через материал (стенку) и теплоотдача от нагретой стенки в окружающее холодное пространство равны, поэтому:

$$q_1 = q_2 = q_3, \quad (17)$$

где q_1 – теплопередача от пламени к материалу (стенке), Вт/м²; q_2 – теплопередача через материал (стенку), Вт/м²; q_3 – теплопередача от материала в окружающее пространство, Вт/м².

Результаты и обсуждение

Комплекс приведенных уравнений дает математическую модель описания температурных характеристик и тепловых потоков на материал при воздействии открытого пламени.

Данная математическая модель имеет ряд упрощений, ограничений и допущений – основные из них следующие.

1. Расчеты проводятся для установившегося стационарного одномерного режима теплопередачи:

– все свойства материала и градиенты температур в каждый момент времени постоянны (прогрева материала не происходит);

– по умолчанию теплофизические свойства материала и газов при изменении температуры поверхности материала постоянны; при необходимости учет изменения теплопроводности и вязкости с температурой возможен (требуется ввод функции, описывающей изменения свойств от температуры);

– теплофизические свойства материала по всей толщине постоянны и одинаковы; при необходимости учет изменения теплопроводности по толщине материала возможен – необходимо проводить расчеты как для многослойного материала, задавая для каждого отдельного слоя свою характеристику (свой закон изменения характеристики по температуре).

2. Поскольку принята одномерная модель теплопередачи, то влияние краевых эффектов и близлежащих посторонних элементов на процессы теплопередачи не учитывается.

3. Пиролиз→термодеструкция→диффузия→выгорание материала отсутствуют, т. е.:

– не происходит никаких тепловых эффектов на поверхности или в объеме материала;

– отсутствует массоперенос;

– геометрические характеристики материала (толщина) постоянны.

4. Коэффициенты черноты для каждой поверхности постоянны во времени.

5. Теплопередача по материалу происходит только за счет теплопроводности, тепловые сопротивления между слоями материала отсутствуют.

6. Теплопередача от пламени осуществляется за счет вынужденной конвекции и теплового излучения. Температура пламени и концентрации дымовых газов по всему объему принимаются постоянными.

7. Теплопередача от поверхности материала к холодному окружающему пространству осуществляется за счет теплового излучения, естественной и/или вынужденной конвекции.

Результаты выполнения расчетов по теплопередаче от пламени через плоский образец материала

Для выполнения расчетов использовали следующий алгоритм действий (рис. 1).

1. Задав температуру наружной (необогреваемой) поверхности материала и условия теплопередачи, рассчитали тепловой поток (теплоотдачу) от материала к окружающему воздуху.

2. Зная тепловой поток и коэффициенты теплопроводности материала, произвели расчет перепада температур по материалу (конструкции) в условиях стационарной теплопередачи и рассчитали температуру на горячей стороне материала.

3. По величине температуры горячей поверхности материала и условий теплопередачи от пламени рассчитали тепловой поток на материал от пламени.

4. Из условий сохранения теплового баланса для стационарной теплопередачи, величины теплового потока, передаваемого от пламени к поверхности материала,

и теплового потока, рассеиваемого от холодной стороны материала, должны быть равны. В случае несоблюдения равенства производят корректировку задаваемой температуры холодной поверхности материала и проводят повторные вычисления по пунктам 1–3.



Рис. 1. Алгоритм расчета температурных характеристик поверхностей материала при воздействии пламени (стационарный процесс)

На основании вышеприведенных уравнений математической модели, алгоритм расчетов реализовали при помощи Excel Microsoft Office с использованием функции «Поиск решения» (рис. 2).

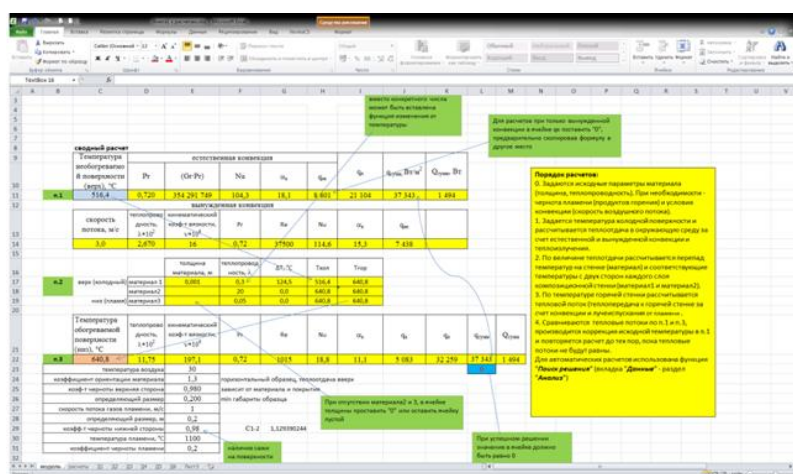


Рис. 2. Фрагмент листа Excel MS с расчетами по температурным характеристикам материала (стационарный режим) при проведении испытаний на огнестойкость

При выполнении расчетов приняты следующие исходные параметры:

– температура окружающего воздуха вдали от материала (образца) равна $+30^{\circ}\text{C}$; при этой температуре воздух имеет следующие свойства – $d=1,165 \text{ кг/м}^3$, $c_p=1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $\lambda=2,67\cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $a=22,9\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\mu=18,6\cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\nu=16,00\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\text{Pr}=0,72$ [26, 27];

– свойства дымовых газов при температуре 1100°C : $d=0,257 \text{ кг/м}^3$, $c_p=1,323 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $\lambda=11,75\cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $a=345,5\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\mu=50,7\cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\nu=197,1\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\text{Pr}=0,57$ [27];

– для некоптящего пламени – в зависимости от химического состава топлива и размера очага пожара, в котором происходит горение, – коэффициент излучательной способности (черноты) пламени составляет от 0,07 до 0,25; для коптящего пламени – в зависимости от величины очага пожара – коэффициент излучательной способности пламени – от 0,3 до 1,0 [29].

С использованием построенной математической модели выполнены расчеты для материалов различной толщины, с различной теплопроводностью (в том числе элементов, сочетающих два слоя), с различными коэффициентами черноты поверхностей и пламени, с различными условиями теплообмена. Результаты приведены на графиках (рис. 3–7). Поскольку в условиях воздействия повышенных температур и открытого пламени точный учет свойств материалов, а также условий теплопередачи практически невозможен, результаты расчетов являются относительными и показывают не точные значения, а тенденции их изменения. Для точной оценки температурных характеристик (температура необогреваемой поверхности материала) требуется внесение поправочных коэффициентов, определяемых опытным путем.

В большинстве случаев при выполнении расчетов, кроме специально оговоренных, по умолчанию принимались следующие значения: коэффициент черноты материала 0,98; коэффициент излучательной способности пламени 0,2; температура пламени 1100°C ; толщина материала 2 мм; скорость потока дымовых газов 1 м/с; для необогреваемой стороны – сочетание естественной и вынужденной конвекции (скорость потока 3 м/с); материал – ПКМ с теплопроводностью $0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

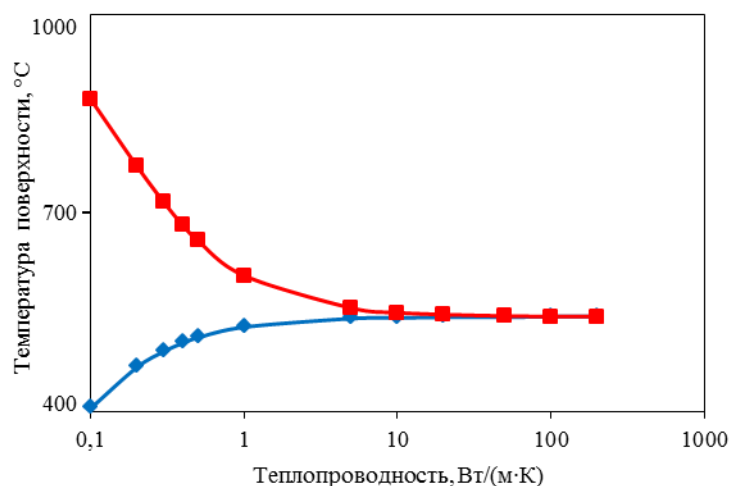


Рис. 3. Расчетное влияние теплопроводности материала на температуры необогреваемой (◆) и обогреваемой (■) поверхности

На рис. 3 показано расчетное влияние теплопроводности материала на температуры обогреваемой и необогреваемой поверхностей материала. Видно, что для материалов с теплопроводностью $>10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ перепад температур по толщине материала незначителен – не более $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$. Для материалов с типичной для ПКМ теплопроводностью $0,3\text{--}0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ перепад температур может составлять $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$, а для материалов с низкой теплопроводностью $0,05\text{--}0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, характерной для вспененных материалов,

перепад температур может превышать 400°C. Наличие такого пеноматериала характерно для вспучивающегося огнезащитного покрытия. Необходимо отметить, что для вспененных материалов теплопередача осуществляется не только с помощью теплопроводности, но и конвекцией газов в порах, и лучеиспусканием. Кроме того, процессы прогрева такого материала зачастую сопровождаются массопереносом, поэтому расчеты, выполненные для такого типа материала, могут оказаться не совсем корректными.

На рис. 4 показано расчетное влияние толщины ПКМ на температуры поверхности. Видно, что с увеличением толщины перепад температур по толщине закономерно возрастает, при этом температура необогреваемой поверхности падает слабее, чем растет температура на обогреваемой стороне. Температура необогреваемой стороны может составлять 400–550°C. Для ряда полимеров при этих температурах может наблюдаться термодеструкция. Поскольку условия воспламенения определяются не только температурными, но и концентрационными факторами, то реальное воспламенение с необогреваемой стороны может и не происходить при условии быстрого отвода образующихся горючих продуктов.

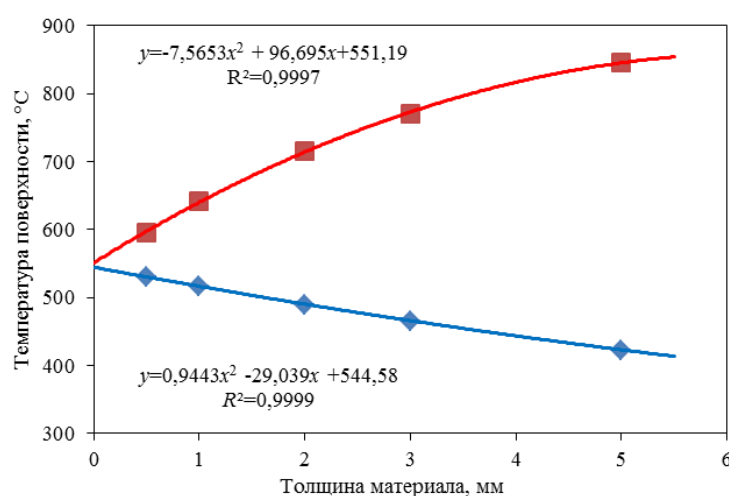


Рис. 4. Расчетное влияние толщины ПКМ на температуры необогреваемой (♦) и обогреваемой (■) поверхности

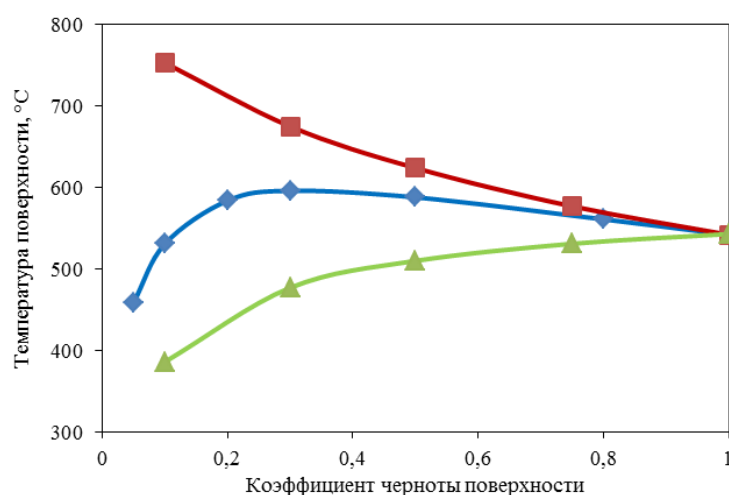


Рис. 5. Расчетное влияние коэффициентов черноты поверхности материала (♦ – общий) на температуру необогреваемой (■) и обогреваемой (▲) поверхности

На рис. 5 показано расчетное влияние коэффициентов черноты поверхности материала на температуру поверхности. Расчеты выполнены для материала толщиной

1 мм с теплопроводностью 20 Вт/(м·К) (нержавеющая сталь, титановые сплавы). Видно, что снижение коэффициента черноты необогреваемой поверхности может привести к существенному росту температуры, а снижение коэффициента черноты обогреваемой поверхности приводит к снижению температуры поверхности. Необходимо отметить, что в условиях воздействия открытого пламени на обогреваемой поверхности материала будет откладываться сажа, т. е. реально коэффициент черноты обогреваемой поверхности всегда будет составлять не менее 0,98. Однако нанесение покрытия с низким коэффициентом черноты (теплоотражающее покрытие) с обогреваемой стороны может существенно замедлить процесс прогрева.

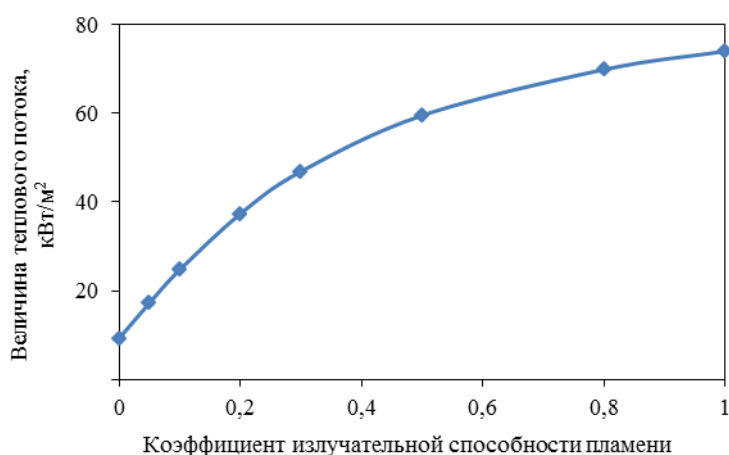


Рис. 6. Расчетное влияние коэффициента излучательной способности пламени на суммарную величину падающего на поверхность материала теплового потока

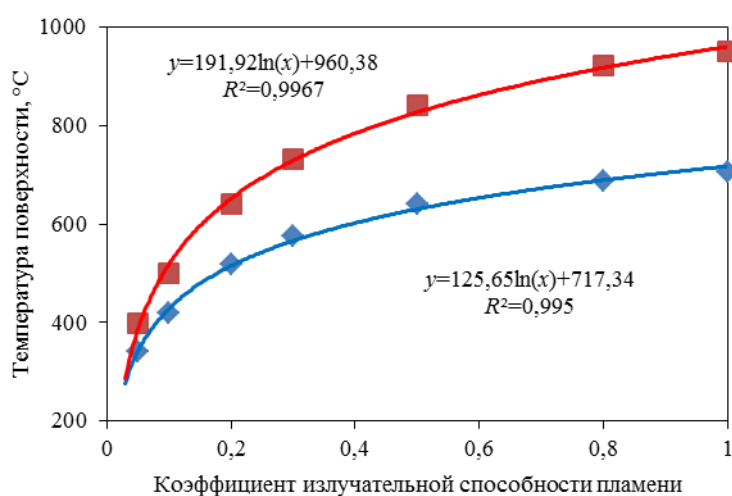


Рис. 7. Расчетное влияние коэффициента излучательной способности пламени на температуры необогреваемой (♦) и обогреваемой (■) поверхности материала

Поскольку коэффициент излучательной способности (черноты) пламени может существенно меняться в зависимости от химического состава топлива и условий горения, то оценка изменения температуры поверхности материала в зависимости от этих условий очень важна, так как фактически может существенно меняться величина теплового потока на материал. Даже при коэффициенте излучательной способности, равном 0,05, доля тепла от пламени, передаваемая излучением, составляет ~50%, а при увеличении коэффициента излучательной способности лучистый тепловой поток возрастает. Согласно расчетам, при изменении коэффициента излучательной способности с 0,05 до 1,0 суммарный тепловой поток на поверхность материала меняется более чем

в 4 раза (с 17 до 74 кВт/м²), а доля тепла, передаваемая излучением, возрастает с 50 до 85% (рис. 6). На рис. 7 показано расчетное влияние коэффициента излучательной способности пламени на температуру поверхности. Видно, что температура даже необогреваемой поверхности композиционного материала может меняться более чем на 350°C.

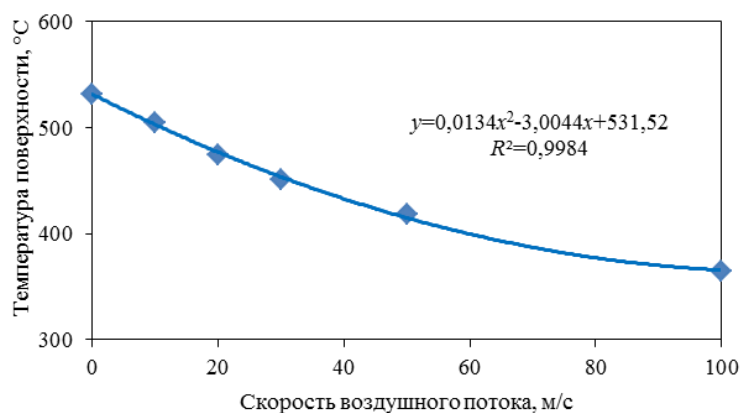


Рис. 8. Расчетное влияние скорости воздушного потока на температуру необогреваемой поверхности материала

При пожаре в двигательном отсеке функции огнезащитной перегородки выполняет оболочка мотогондолы или капот. Поскольку внешняя (необогреваемая) сторона материала во время полета обдувается набегающим потоком воздуха, было целесообразно оценить влияние скорости потока на изменение температуры поверхности. Результаты расчетов приведены на рис. 8. Видно, что с увеличением скорости воздушного потока от 0 до 100 м/с (0–400 км/ч) температура необогреваемой стороны снижается более чем на 100°C.

Заключения

Построена математическая модель теплопередачи от пламени через плоскую монолитную поверхность (имитация работы огнеблокирующей перегородки), обеспечивающая возможность оценки влияния различных факторов: состава материала и строения конструктивного элемента, а также условий воздействия на температуру поверхности монолитного материала.

Проведены оценочные расчеты по влиянию теплопроводности, толщины, коэффициентов черноты поверхностей материала, коэффициента излучательной способности пламени, скорости воздушного потока на температуру поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25; 5-е изд., с поправками 1–8: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
2. Нормы летной годности двигателей воздушных судов: АП-33; 3-е изд., с поправками 33-1 и 33-2: утв. Постановлением 32-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 17.02.2012. М.: Авиаиздат, 2012. 86 с.
3. Барботько С.Л. Требования авиационных норм и методы оценки пожарной безопасности авиационных материалов: история, современное состояние и перспективы развития // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России, 2014. №3. С. 23–33.
4. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Луценко А.Н., Шуркова Е.Н. 1) Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015.

- №1. С. 2–9. 2) Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №2. С. 2–9.
5. Барботько С.Л. Пожарная опасность, методы оценки и требования к материалам для изготовления внешнего контура авиационной техники // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России, 2014. №4. С. 6–15.
 6. Барботько С.Л., Кириенко О.А., Вольный О.С., Луценко А.Н. Анализ пожарной опасности мотогондол авиационных двигателей и других пожароопасных зон; используемые методы огневых испытаний материалов и конструктивных элементов на соответствие требованиям авиационных норм // Проблемы безопасности полетов, 2017. №5. С. 3–24.
 7. Powerplant Installation and Propulsion System Component Fire Protection Test Methods, Standards, and Criteria // Advisory Circular. 1990. No. 20-135. 18 p.
 8. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes: CS-25, Amendment 15 / EASA. July 21, 2014. 921 p.
 9. Standard Fire Apparatus and Procedure (For Flexible Hose Assemblies) // Powerplant Engineering Report No. 3A (revised) / U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standard Service. Washington, 1978. 35 p.
 10. Aircraft Materials Fire Test Handbook / U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center. New Jersey, 2000. No. DOT/FAA/AR-00/12. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/handbook.stm> (дата обращения: 06.06.2017).
 11. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017).
 12. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Стеклопластики на термопластичной матрице // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №7. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017).
 13. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
 14. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 14. №4 (3). 2012. С. 834–839.
 15. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Куцевич К.Е. Клеевые препреги на основе тканей Pocher – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №6. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-10-10.
 16. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
 17. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Луценко А.Н., Барботько С.Л. Сравнительная оценка пожаро-безопасности ПКМ для изготовления конструктивных элементов летательных аппаратов // Пожаровзрывобезопасность. 2014. №2. С. 20–27.
 18. Шуркова Е.Н., Барботько С.Л., Дементьева Л.А., Сереженков А.А. Сопоставление пожаро-безопасности ПКМ на основе клеевых препрегов, используемых для изготовления конструкций внешнего контура авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №8. С. 13–17.
 19. Барботько С.Л., Шуркова Е.Н. О пожарной безопасности материалов, используемых для изготовления внешнего контура самолетов // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. №10. С. 19–24.
 20. Барботько С.Л., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Скрылев Н.С. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов для внешнего контура авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 56–59.

21. Мишуров К.С., Мишкин С.И. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-39 // Труды ВИАМ: электрон.-науч. технич. журн. 2016. №12 (48). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
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. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
24. 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.
25. 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.
26. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов, 9-е изд. / под ред. П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1981. 560 с.
27. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. 3-е изд. М.: Энергия, 1975. 280 с.
28. Дубровкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: справочник. М.: Химия, 1985. С. 145–149.
29. Балайка Б., Сикора К. Процессы теплообмена в аппаратах химической промышленности / перевод Г.М. Гольденберга; под ред. В.А. Григорьева. М.: Машгиз, 1962. С. 141–153.
30. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.