

УДК 620.1

*С.Л. Барботько¹, О.С. Вольный¹, Е.Н. Шуркова¹***ПОСТРОЕНИЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ,
ОПИСЫВАЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧЕСТИ
(ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОГО ГОРЕНИЯ)
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116

При выполнении квалификации материалов, как правило, ограничиваются проведением испытаний 1–3 толщин, которые выбирают достаточно произвольно, что не гарантирует получения полной информации о пожароопасных характеристиках. Поэтому задача установления закономерности изменения характеристик пожарной опасности в зависимости от толщины образца и построения математической модели, описывающей эту закономерность, является актуальной.

Проведен анализ изменения продолжительности самостоятельного остаточного горения в зависимости от толщины образца и построена феноменологическая модель.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, горючесть, остаточное горение, толщина образца, математическая модель.

*S.L. Barbotko¹, O.S. Volnyj¹, E.N. Shurkova¹***CREATION OF THE PHENOMENOLOGICAL MODEL
DESCRIBING CHANGE OF THE CHARACTERISTIC OF COMBUSTIBILITY
(DURATION OF RESIDUAL BURNING) DEPENDING
ON THICKNESS OF POLYMERIC MATERIAL**

At performance of qualification of materials are, as a rule, limited to carrying out tests of 1–3 thickness which get out enough randomly and do not guarantee obtaining the complete information about fire-dangerous characteristics. Therefore the problem of establishment of pattern of change of characteristics of fire danger depending on thickness of sample and creation of the mathematical model describing this pattern is the actual.

In this work the analysis of change of duration of independent residual burning depending on thickness of sample is carried out and the phenomenological model is constructed.

Keywords: polymeric composite material, combustibility, residual burning, sample thickness, mathematical model.

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

В настоящее время постоянно расширяется область применения полимерных материалов в различных изделиях. Все больше они используются в качестве конструктивных материалов, постепенно вытесняя металлы и их сплавы, так как зачастую превосходят их по физико-механическим и весовым характеристикам.

Основные широко применяемые металлические сплавы на основе железа, алюминия или титана не загораются от малокалорийных источников воспламенения и обычно в условиях пожара практически не участвуют в экзотермических реакциях окисления. Подавляющее большинство полимерных материалов, в отличие от указанных металлических сплавов, способны к реакциям термоокислительной деструкции, сопровождающимся наличием открытого пламени, интенсивным выделением тепла и различных газообразных продуктов, т. е. являются в той или иной степени пожароопасными.

Одним из основных методов определения пожарной опасности полимерных материалов является оценка их способности воспламеняться, гореть и распространять пламя по поверхности, а также затухать при удалении источника зажигания. Обычно этот метод называют методом определения горючести или воспламеняемости. Оценка горючести материалов может проводиться с помощью большого количества различных стандартов, например в различных отраслях промышленности, в разных странах и для разных видов полимерных материалов для определения характеристик горючести могут использоваться несколько десятков вариантов методов испытаний [1, 2]. Так, для авиационной отрасли [3, 4] используется метод оценки горючести, описанный в отечественных и зарубежных авиационных нормах [5–7], фактически являющийся аналогом стандартов ANSI/ASTM F501, ASTM D6413, ICAO Technical Manual Doc. 9051-AN/896 и ГОСТ Р 57924.

В зависимости от функционального назначения конструктивного элемента (панели стен, потолка, перегородок, пола, шторки, электронные платы, элементы приборов и др.) и места применения материала (пассажирский салон, багажно-грузовой отсек, места прохода, кухни и т. д.) в определенном типе авиационной техники (большие транспортные самолеты, легкие самолеты, вертолеты) используется тот или иной вариант метода испытаний. Основными методами оценки горючести являются:

- вертикальные испытания (продолжительность экспозиции пламенем горелки 12 или 60 с);
- горизонтальные испытания по определению скорости распространения пламени;
- испытания образцов в положении под углом 45 градусов к горизонту для панелей багажно-грузовых отсеков;
- испытания образцов электрических проводов в положении под углом 60 градусов к горизонту.

В зависимости от конкретного метода испытаний материалов на горючесть в качестве критериев оценки используются следующие характеристики: время начала воспламенения, продолжительность остаточного (самостоятельного) горения (тления), длина прогорания (обуглившейся части), скорость распространения пламени, наличие и продолжительность горения падающих капель, максимальная высота пламени, потеря массы и др. Для вертикального метода испытаний авиационных материалов основными нормируемыми характеристиками, по которым судят о допустимости применения материала, являются длина прогорания, продолжительность остаточного (самостоятельного) горения образца и падающих капель.

Регистрируемые значения характеристик пожарной опасности зависят не только от химического состава и строения (в случае оценки характеристик композита) полимерного материала, но также от его толщины и количества подведенного к образцу тепла, которое фактически определяется продолжительностью экспозиции. Поскольку в изделиях могут применяться материалы различной толщины, то для определения соответствия требованиям нормативных документов должны быть испытаны все возможные варианты толщин. Следовательно, формально, согласно существующим в настоящее время требованиям авиационных норм, должны быть испытаны образцы, даже если различие между толщинами составляет менее миллиметра. Однако формальные требования по определению характеристик пожарной опасности материалов для всех возможных

толщин на практике невыполнимы, так как реальное применение материалов возможно в диапазонах от 0,2–0,3 (1 монослой) до 20 мм и более. При этом шаг изменения толщины составляет толщину одного монослоя, т. е. 0,2–0,3 мм. Таким образом, диапазон всех возможных толщин может составлять несколько десятков вариантов. Реальное проведение такого количества огневых экспериментов очень трудоемко и материалоемко и совершенно неоправданно с экономической точки зрения. Поэтому в действительности эксперты на свое усмотрение расширяют допустимость применения других толщин материала на основании имеющегося объема испытаний, собственного опыта и понимания закономерностей изменения свойств. Таким образом, в случае большого ассортимента применяемых толщин или использования в конструкции изделия детали переменной толщины возникает неопределенность: какие именно толщины надо испытывать, какие толщины могут представлять наибольшую пожарную опасность (иметь наихудшие характеристики) и какая существует закономерность изменения этих характеристик.

Во ФГУП «ВИАМ» проводят разработку и квалификацию (паспортизацию) новых отечественных материалов [8–15], выполняют работы по проведению сертификационных огневых испытаний по заявкам авиастроительных предприятий, поэтому задача установления закономерностей по изменению пожароопасных характеристик с изменением толщины образца является весьма актуальной.

Под руководством Федеральной авиационной администрации США уже более 10 лет функционирует Международная рабочая группа по пожаробезопасности материалов авиационного назначения [16–18]. По результатам проведенных международных исследований [19] был выпущен документ, регламентирующий многие вопросы проведения испытаний для сертификации [20]. Но работа по некоторым вопросам, в том числе по влиянию толщины образцов на характеристики пожарной опасности, продолжается [21, 22].

Ранее специалистами ФГУП «ВИАМ» выполнен некоторый анализ характеристик горючести образцов авиационных материалов различной толщины [23]. Задачами данной работы являлись обобщение имеющихся результатов, построение формальной математической модели, описывающей полученные результаты испытаний, и анализ достаточности проводимого объема огневых испытаний.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов и неразрушающий контроль», комплексная проблема 2.2. «Квалификация и исследования материалов» (Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [24–26].

Материалы и методы

При проведении данной работы использовали результаты огневых испытаний по определению характеристик горючести в соответствии с требованиями авиационных норм следующих полимерных композиционных материалов (ПКМ) авиационного назначения:

– стеклопластики на различных типах полимерных связующих и стеклонаполнителей марок БМИ-3, ВПС-33, ВПС-36, ВПС-39П, ВПС-42П, ВПС-47, ВПС-48, КАСТ-ВС, ВПС-37К (КМКС-2м.120), КТМС-1П, СТ-69(М), СТ-520, ЭПС-2, МСТ-10П;

– углепластики на различных типах полимерных связующих и углеродных наполнителей марок ВКУ-17К (КМКУ-3.150), ВКУ-18, ВКУ-22, ВКУ-23, ВКУ-24, ВКУ-25, ВКУ-26, ВКУ-28, ВКУ-29, ВКУ-32, ВКУ-33, ВКУ-39, ВКУ-47И, ВКУ-48, КМКУ-2м.120, КМУ-7тМПС;

– органопластики на различных типах полимерных связующих марок Органит 5Н, УП-2217/Русар, опытный (состав не раскрывается).

Подробное описание метода испытания образцов материалов на горючесть приведено в ГОСТ Р 57924 (метод 2) и в тексте Авиационных правил АП-25 (Приложение F, Часть I) [5]. В этих же документах приведены описание конструкции оборудования, все необходимые процедуры по его подготовке к проведению испытаний, подготовке и непосредственно проведению испытаний образцов, регистрируемым параметрам, обработке и оформлению результатов.

Результаты и обсуждение

В соответствии с принятой многолетней практикой при исследованиях и последующей паспортизации материала, как правило, проводят испытания трех толщин материалов: около 1; 2 и 4–5 мм. Таблицы с результатами испытаний образцов ПКМ на горючесть приведены в работе [23], обобщенные сводные данные в графическом виде представлены на рис. 1.

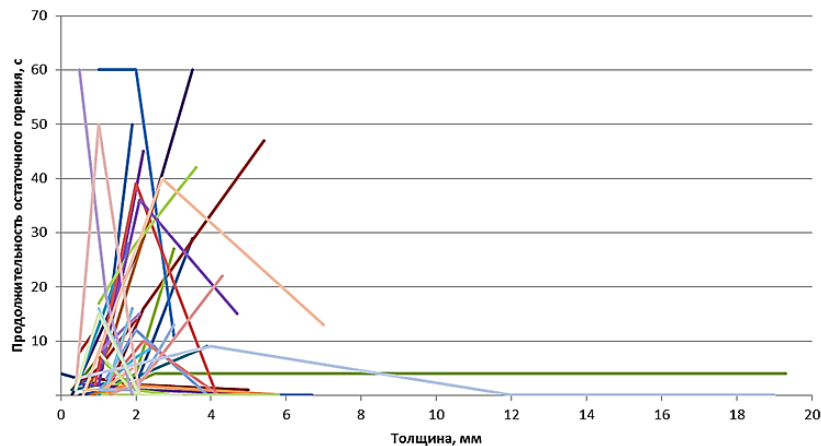


Рис. 1. Сводные данные по продолжительности остаточного горения различных ПКМ

В зависимости от вида полимерной матрицы, толщины образца, примененного наполнителя и продолжительности экспозиции наблюдаются различные значения продолжительности остаточного горения, которая может составлять от нуля секунд до нескольких минут.

Для улучшения визуализации зависимости изменения продолжительности остаточного горения от толщины образца полученные данные разделили на группы в зависимости от типа наполнителя (стеклянные, углеродные или органические волокна) и продолжительности экспозиции образцов пламенем горелки (60 или 12 с). Для сведения воедино данных по различным материалам использовали поправочные коэффициенты приведения (примененные коэффициенты различались в зависимости от марки полимерной матрицы), при этом приведенная относительная продолжительность остаточного горения меняется в интервале от 0 до 1 (1 соответствует максимально возможной продолжительности горения, равной или превышающей 60 с). Полученные результаты представлены на рис. 2.

При анализе данных в общем случае можно определить следующие закономерности:

- при минимальной толщине образца продолжительность остаточного горения минимальна или близка к нулевым значениям;
- при увеличении толщины образца продолжительность остаточного горения с некоторой толщины начинает возрастать;
- для большинства материалов существует некоторая «критическая» толщина, при которой продолжительность остаточного горения является наибольшей;

– в зависимости от типа полимера и наполнителя наибольшая продолжительность остаточного горения может определяться как временем распространения пламени по всей высоте и полным выгоранием образца, так и продолжительностью затухания при отсутствии прогорания образца по всей длине;

– при дальнейшем увеличении толщины образца продолжительность остаточного горения снижается до некоторой минимальной величины, которая в зависимости от вида ПКМ может как равняться нулю, так и иметь другое значение.

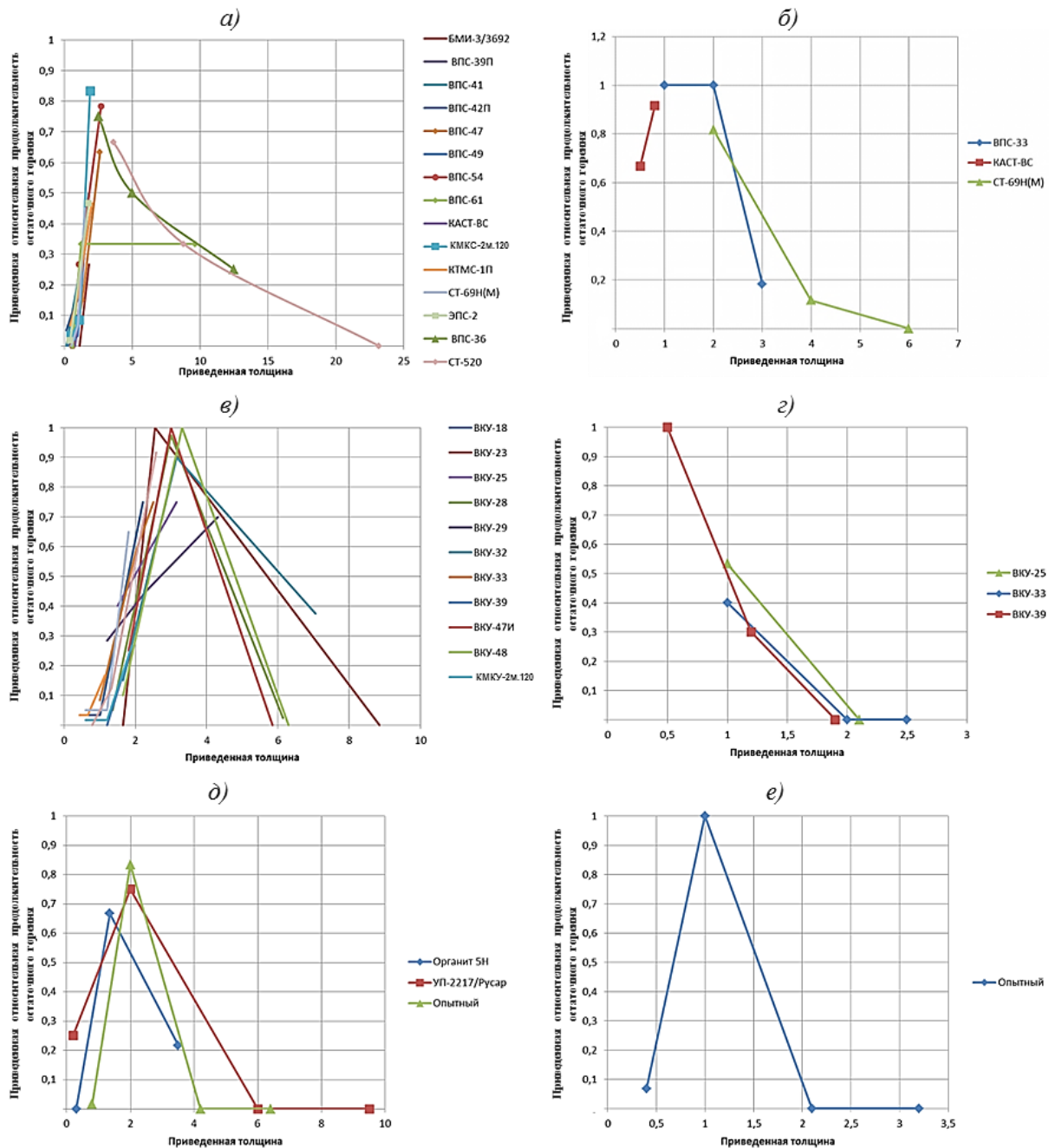


Рис. 2. Зависимости изменения продолжительности остаточного горения от толщины образца для стеклопластиков (а, б), углепластиков (в, г) и органопластиков (д, е) при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 (а, в, д) или 12 с (б, г, е)

Таким образом, видно, что закономерность изменения продолжительности остаточного горения от толщины не соответствует закономерности, принятой в рекомендательном документе PS-ANM-25.853-01-R2 Федеральной авиационной администрации США [20], в котором отмечено, что наибольшей пожарной опасностью по характеристике горючести обладает наиболее тонкий из образцов.

В общем виде изменение продолжительности остаточного горения от толщины образца имеет вид кривой с максимумом при некоторой «критической» толщине и двумя ветвями: имеется очень крутая восходящая ветвь от минимально возможной (нулевой) толщины до области максимума и сравнительно пологая нисходящая ветвь. При этом в области максимума в зависимости от типа полимерного связующего и наполнителя, а также длительности экспозиции продолжительность остаточного горения может варьироваться в очень больших пределах – от нулевой продолжительности для термостойких полимерных связующих (например, углепластики ВКУ-22 и ВКУ-24) до практически бесконечности, фактически определяемой только размерами образца и длительностью его полного выгорания (например, стеклопластики ВПС-33, ВПС-48, углепластик ВКУ-39 и др.).

Величина «критической» толщины, при которой наблюдается максимальная продолжительность остаточного горения, зависит как от продолжительности экспозиции образца пламенем горелки, так и от вида наполнителя и полимерной матрицы и, как правило, составляет 0,5–2 мм для продолжительности экспозиции пламенем горелки 12 с и 1–5 мм – при экспозиции 60 с.

Короткая продолжительность остаточного горения при небольшой толщине образца объясняется малым количеством горючего вещества, которое преимущественно успевает выгореть за время экспозиции образца пламенем горелки. Поэтому восходящая ветвь имеет большую крутизну и при сравнительно небольшом диапазоне изменения толщины результаты меняются от нулевой продолжительности остаточного горения до максимальной.

Уменьшение продолжительности остаточного горения при большой толщине образца объясняется увеличением теплопотерь (затраты тепла на прогрев образца). При некоторой толщине (так называемый «термически толстый слой») характеристика продолжительности остаточного горения достигает некоторого постоянного уровня, в большинстве случаев при испытаниях огнезащищенных ПКМ авиационного назначения это нулевая продолжительность остаточного горения, но могут наблюдаться и другие значения, вплоть до распространения пламени по всей поверхности образца и его полного выгорания.

Закономерность изменения продолжительности остаточного горения от толщины в первом приближении может быть описана кривой, подчиняющейся уравнению вида

$$1/z = 1/x + 1/y, \quad (1)$$

где z – относительная продолжительность остаточного горения образца; x и y – переменные, описывающие восходящую и нисходящую ветви, которые являются функциями от толщины образца.

Для описания переменных x и y в первом приближении могут быть использованы экспоненциальные функции, обеспечивающие приведение толщины к нормализованному виду (изменяющемуся в интервале от 0 до 1, где 1 соответствует случаю полубесконечной толщины):

$$x = a(1 - \exp(-k_1 \delta)); \quad (2)$$

$$y = b \exp(-k_2 \delta), \quad (3)$$

где a , b , k_1 и k_2 – коэффициенты; δ – толщина образца.

Поскольку у образцов может начать увеличиваться продолжительность горения (т. е. продолжительность горения становится больше нуля) при толщинах, отличающихся от нулевой толщины, необходимо ввести дополнительный поправочный коэффициент c , учитывающий сдвиг кривой вдоль оси абсцисс. Вследствие того, что материал не может иметь отрицательной продолжительности горения, уравнение (2) приобретает вид:

$$\begin{cases} x \rightarrow 0 & \text{при } \delta \leq c, \\ x = a(1 - \exp(-k_1(\delta - c))) & \text{при } \delta > c. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку образцы при большой толщине могут иметь некоторую величину остаточного горения, отличную от нуля, то уравнение (3) преобразуется в следующее:

$$y = b \exp(-k_2 \delta) + d, \quad (5)$$

где d – коэффициент.

Тогда уравнение (1) с учетом уравнений (4) и (5) преобразуется в следующую систему:

$$\begin{cases} z = 0 & \text{при } \delta \leq c, \\ z = \frac{1}{\frac{1}{a(1 - e^{-k_1(\delta - c)})} + \frac{1}{be^{-k_2\delta} + d}} & \text{при } \delta > c. \end{cases} \quad (6)$$

Внешний вид функции, описываемой уравнением (6) при заданных значениях коэффициентов $a=b=k_1=k_2=1$ и $c=d=0$, приведен на рис. 3.

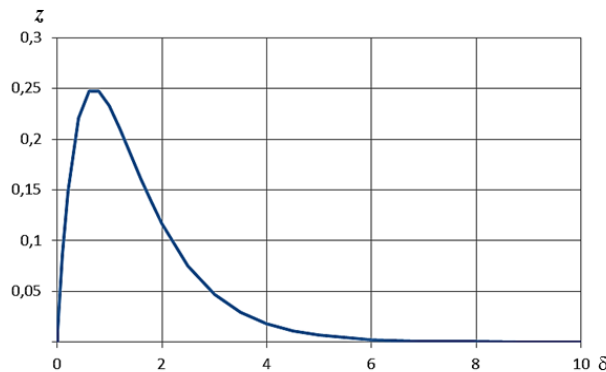


Рис. 3. Внешний вид функции, описываемой уравнением (6)

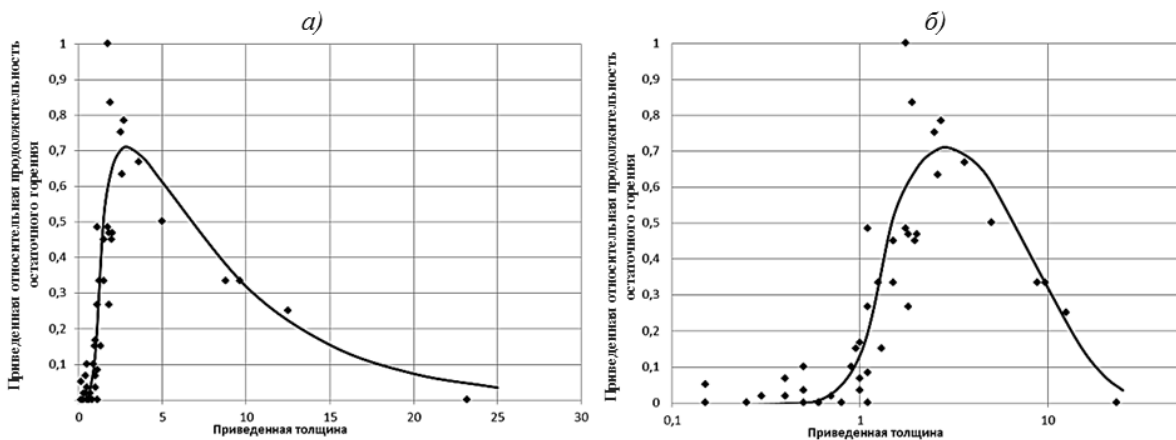


Рис. 4. Применение функции, выраженной уравнением (6), для описания данных, приведенных на рис. 2, а (стеклопластики, при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с) на графиках в обычной (а) и полулогарифмической (б) системах координат

В качестве примера на рис. 4 представлено сопоставление приведенных экспериментальных значений продолжительности остаточного горения стеклопластиков при времени экспозиции пламенем газовой горелки в течение 60 с и расчетных величин, полученных из уравнения (6). Коэффициент корреляции составляет $>0,9$. Таким образом, достигнуто удовлетворительное соответствие между предложенной феноменологической моделью, описывающей продолжительность остаточного горения, и экспериментальными данными. Аналогичное соответствие получено и для других типов ПКМ и продолжительности экспозиции (рис. 5 и 6).

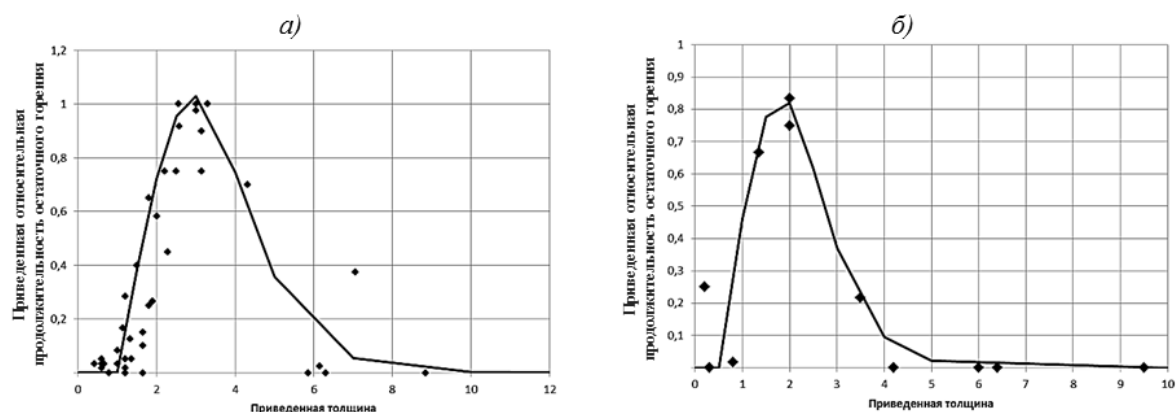


Рис. 5. Результаты испытаний, представленные функцией (6), для углепластиков (а) и органопластиков (б) при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с

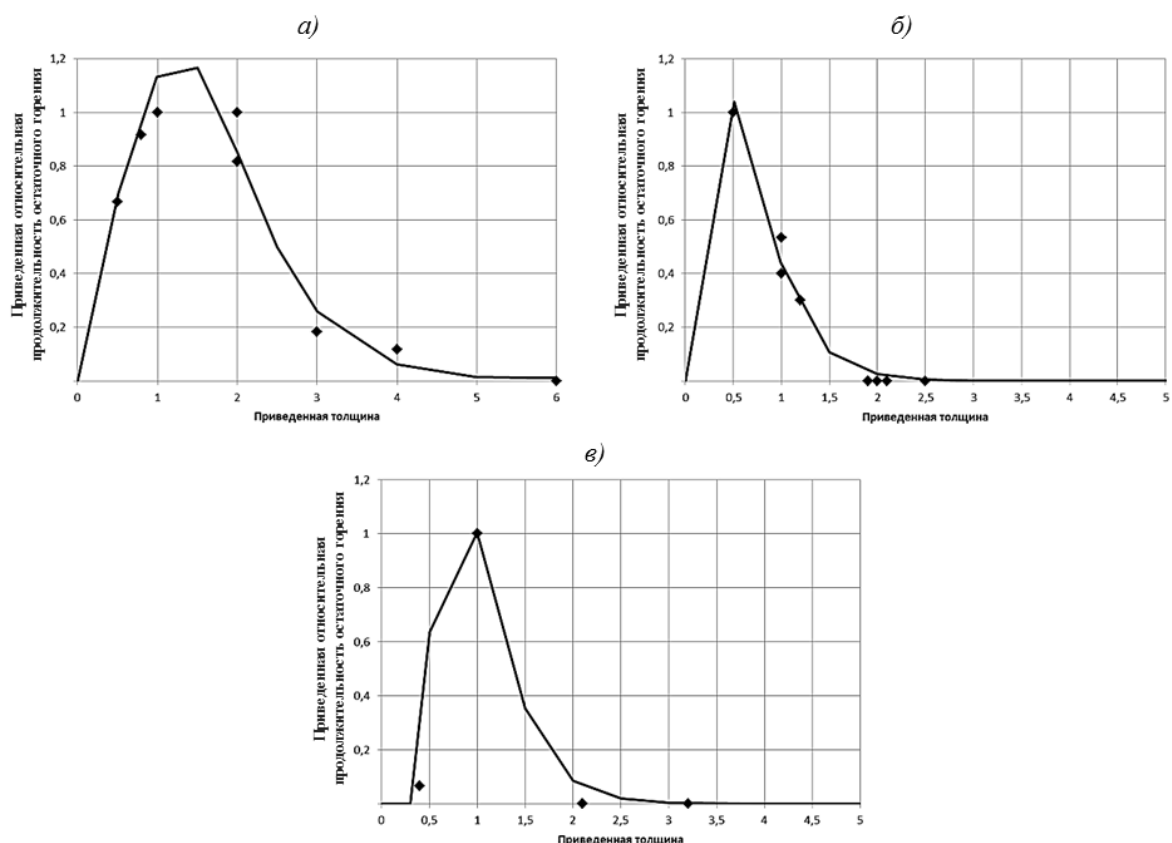


Рис. 6. Результаты испытаний, представленные функцией (6), для стеклопластиков (а), углепластиков (б) и органопластиков (в) при продолжительности экспозиции пламенем горелки 12 с

Анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что зачастую испытание трех толщин одного материала не дает возможности получить полный спектр изменения характеристики продолжительности остаточного горения. Поэтому фактически при проведении квалификации должен использоваться больший ряд испытываемых толщин. На основе анализа имеющегося массива данных можно предложить испытывать минимально возможную толщину (0,2–0,5 мм), далее 1, 2, 3, 5 мм и, может быть, около 10 мм, если такие толщины монолитных ПКМ предполагаются к применению, и образцы при толщине 5 мм имеют значительную продолжительность остаточного горения.

Заключения

Установлено, что закономерность изменения продолжительности остаточного горения в зависимости от толщины имеет вид кривой, изменяющейся от минимальных (нулевых) значений при минимальной толщине образцов до некоторого максимума и в дальнейшем снижающейся до некоторых минимальных (в общем случае не нулевых) значений при возрастании толщины образца до максимально возможных величин («полубесконечное тело»).

Выбрана система уравнений, описывающая закономерность изменения продолжительности остаточного горения образцов при испытаниях по определению горючести в соответствии с требованиями авиационных норм.

Для различных классов ПКМ (стеклопластики, углепластики, органиты) и для различных продолжительностей остаточного горения показано удовлетворительное описание экспериментальных данных предложенной феноменологической моделью.

Установлено, что оценка характеристик пожарной опасности полимерных материалов всего по трем вариантам толщины в общем случае является недостаточной и не всегда позволяет полно охарактеризовать поведение материала во всем возможном диапазоне толщин. Желательно при проведении квалификации проводить испытания на большем диапазоне возможных толщин материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Луценко А.Н., Шуркова Е.Н. Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №1. С. 2–9.
2. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Сопоставление описанных в отечественных государственных стандартах методов оценки горючести текстильных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. №5. С. 30–41.
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. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
5. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
6. Aircraft Materials Fire Test Handbook. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/handbook.stm> (дата обращения: 29.09.2018).
7. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 15. July 21, 2014. 921 p.
8. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Котова Е.В., Мельников Д.А. Клеевые связующие для полимерных и слоистых алюмополимерных композиционных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1–2. Ст. 07. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 29.09.2018).

9. 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: 29.09.2018).
10. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
11. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
12. 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. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 834–839.
13. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Куцевич К.Е. Клеевые препреги на основе тканей Porcher – 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: 29.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-10-10.
14. Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451.
15. Синяков С.Д., Застрогина О.Б., Павлюк Б.Ф. Композиции на основе фенолформальдегидных смол, модифицированных поливинилацетатами (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. №1–2. Ст. 08. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 29.09.2018).
16. Campbell S., Jensen M. Flammability standardization task group // The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference (October 25–28 2010, Atlantic City, NJ). URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 29.09.2018).
17. Campbell S. Approved Materials List // International Aircraft Materials Fire Test Working Group Meeting (March 7, 2017, Mobile, Alabama, USA). URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 29.09.2018).
18. Gardlin J. FAA Aircraft Certification Service (AIR) Transformation // International Aircraft Systems Fire Protection Working Group Meeting (November 2, 2017, Atlantic City). URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 29.09.2018).
19. Cambell S., Jensen M., Sattayatom P. Flammability Standardization Task Group – Final Reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo, August 20, 2009. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/tc12-10.pdf> (дата обращения: 29.09.2018).
20. Flammability Testing of Interior Materials: PS-ANM-25.853-01-R2. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/flammabilitytestingofinteriormaterialsfinal.pdf> (дата обращения: 29.09.2018).
21. Clarifications and Additions for Future Advisory Circular: PS-ANM-25.853-01-R2 // 8th Triennial Fire & Cabin Safety Research Conference (October 24–27, 2016). URL: <https://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 29.09.2018).
22. Clarifications and Additions for Future Advisory Circular: PS-ANM-25.853-01-R2 // FAA International Aircraft Materials Fire Test Working Group Meeting (October 30, 2017, Atlantic City, New Jersey). URL: <https://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 29.09.2018).
23. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 1. Испытания на горючесть. Влияние толщины образца на регистрируемые характеристики // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. №1. С. 40–48.
24. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
25. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
26. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.