

УДК 678.026

*М.А. Венедиктова¹, А.П. Петрова¹, С.Л. Барботько¹, Я.А. Брык¹***ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ АНТИПИРЕНОВ В СОСТАВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ШПАТЛЕВКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-35-43

Проведена оценка возможности замены Фосполиола-II в составе теплозащитной шпатлевки на экологически безопасные антипирены отечественного производства, синтезированные без применения экологически опасного дихлорангидрида метилфосфоновой кислоты с целью снижения токсичности и загрязнения окружающей среды при изготовлении и переработке. Проведена сравнительная оценка экологической безопасности антипиренов, а также физико-механических и теплофизических характеристик теплозащитной шпатлевки с Фосполиолом-II и новыми антипиренами.

Ключевые слова: полимерные теплозащитные материалы, антипирены, фосфорорганические соединения, шпатлевки.

*М.А. Venediktova¹, A.P. Petrova¹, S.L. Barbotko¹, Ya.A. Bryk¹***APPLICATION OF NEW ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ORGANOPHOSPHORUS FLAME RETARDANTS IN THE COMPOSITION OF HEAT-PROTECTIVE PUTTY**

In work the assessment of possibility of replacement of Fospoliol-II as a part of heat-protective putty on new environmentally friendly organophosphorus flame retardants of domestic production for the purpose of decrease in toxicity and environmental pollution when manufacturing and processing has been carried out. The comparative assessment of ecological safety of flame retardants, and also mechanical, thermophysical characteristics of heat-protective putty with Fospoliolom-II and new fire-retarding agents is carried out.

Keywords: polymer composite materials, flame retardants, organophosphorus compound, putty.

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

Устойчивость работы специальной техники во многом определяется ее способностью противостоять тепловому воздействию. Для защиты элементов конструкции от данного вида воздействия применяются различные методы. При этом важно обеспечить максимально возможный температурный перепад между горячей внешней средой и защищаемой рабочей поверхностью конструкции. Указанную задачу можно решить максимально эффективно путем применения абляционных теплозащитных материалов.

Наиболее технологичными, простыми в переработке и эффективными при защите от теплового, аэродинамического воздействия и эрозийного разрушения являются напыляемые полимерные теплозащитные материалы (ТЗМ). Для обеспечения эффективной работы летательных аппаратов во ФГУП «ВИАМ» разработаны напыляемые ТЗМ (шпатлевки) марок ВШ-4, ВШ-27Ф, ВШ-РС-1, ВТЗ-1 и т. д., кратковременно работающие при температурах до 1400 °С. Шпатлевки марок ВШ-4 и ВШ-27Ф, разработанные еще в 1960-х годах, в настоящее время успешно применяются

на предприятиях отрасли. Технологическим преимуществом полимерных ТЗМ в виде шпатлевочной композиции являются низкая плотность (до $0,8 \text{ г/см}^3$) и возможность нанесения на поверхности сложной конфигурации любых размеров [1–4].

При этом важно отметить, что в процессе горения полимеров образуются продукты, загрязняющие окружающую природную среду и оказывающие вредное воздействие на организм человека. Поэтому задача создания трудносгораемых и трудновоспламеняемых полимерных материалов является весьма актуальной и такие материалы находят широкое применение в различных отраслях техники [5–7].

В настоящее время эффективным способом снижения горючести полимерных материалов является применение огнегасящих добавок – антипиренов.

Антипирены обычно придают огнезащитные свойства материалам в конденсированной или газовой фазе. В конденсированной фазе добавка может отводить от субстрата тепловую энергию, действуя как теплопоглотитель, или участвовать в образовании слоя кокса, препятствующего тепло- и массопереносу. Данные компоненты также могут обеспечивать огнестойкость за счет теплопроводности, испарения или разбавления горючей массы или за счет участия в эндотермических химических реакциях [8].

Для применения в качестве ингибиторов горения большой интерес представляют галоген- и фосфорсодержащие вещества по причине простоты изготовления, они обладают высокой эффективностью при воздействии пламени и действуют по различным механизмам. Галогенсодержащие добавки уменьшают активность радикалов при горении, а фосфорорганические антипирены приводят к образованию слоя кокса на границе раздела ТЗМ и огневого фронта, что ограничивает образование летучих веществ, способствующих распространению пламени, а также создает теплоизоляционный барьер [9].

Однако большинство из них в процессе горения полимерных материалов приводят к образованию токсичных продуктов, оказывающих негативное влияние на человека и окружающую среду [10–15]. В связи с вышеперечисленным проблема снижения горючести полимеров за счет применения эффективных и экологически чистых систем является крайне актуальной [16–19].

Прекращение производства ряда исходных компонентов, ограничение производства экологически опасных веществ, а также поступление на российский рынок широкого перечня импортных материалов теплозащитного назначения привели к снижению производства отечественных ТЗМ на основе фенолформальдегидных связующих [18, 20, 21]. Восстановление утраченных технологий производства дефицитных компонентов и исключение из составов экологически опасных компонентов или замена их на экологически безопасные довольно актуальная задача, поскольку ТЗМ распространены в российской технике.

Одним из широко используемых антипиренов, обеспечивающих снижение горючести и одновременно высокую стойкость ТЗМ к эрозионному воздействию, является Фосполиол-II, представляющий собой фосфорорганический антипирен, синтезируемый на основе дихлорангидрида метилфосфоновой кислоты. Производство данного исходного компонента ограничено в соответствии со списком 2 «Конвенции о запрещении разработки, накопления и применения химического оружия и его уничтожении» [22].

Разработка технологии и методов синтеза новых фосфорсодержащих антипиренов с квотой превосходства по экологической безопасности по сравнению с широко распространенным антипиреном Фосполиолом-II проведена во ФГУП «ГосНИИОХТ», которое обладает большим опытом в области синтеза фосфорорганических соединений различных типов.

В то же время в области исследования и разработки ТЗМ актуальной проблемой является достижение наиболее полного совмещения полимера и антипирена, обеспечивающих сохранение прочностных показателей и технологичности ТЗМ. Для решения данной задачи необходима разработка состава и технологии синтеза антипиренов с учетом природы ТЗМ [16, 19, 23].

В данной работе проведены исследования по определению возможности замены Фосполиола-II в составе теплозащитной шпатлевки ВШ-27Ф (ТУ 1-595-28-188–2018) на экологически безопасные антипирены отечественного производства с целью снижения токсичности и загрязнения окружающей среды при ее изготовлении и переработке.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.5. «Теплозащитные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [24].

Материалы и методы

Исследования проводили с применением двух экспериментальных образцов антипиренов, синтезированных во ФГУП «ГосНИИОХТ» без использования дихлорангидрида метилфосфоновой кислоты, являющегося экологически опасным компонентом. Синтез фосфорорганических антипиренов осуществляли с применением трихлорфосфина, метилалля и пентаэритрита.

Физико-химические свойства антипиренов определены аналитическими методами (ТУ 2226-115-00210045–2000, ГОСТ 9.902–81) [16] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых антипиренов

Свойства	Значения свойств для		
	Антипирена 1	Антипирена 2	Фосполиола-II
Содержание фосфора, % (по массе)	8,55	12,66	Не менее 10
Содержание гидроксильных групп, % (по массе)	10,34	6,60	10–15
Кислотность, %	1,58	0,74	Не более 1,0

Характеристики исследуемых антипиренов, оцененные с позиции обеспечения экологической безопасности, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная оценка экологической безопасности антипиренов

Критерии экологической безопасности	Фосполиол-II	Антипирен 1, Антипирен 2
Токсичность используемого сырья	II–III класс опасности (высокоопасные и умеренно опасные вещества)	III–IV класс опасности (умеренно опасные и малоопасные вещества)
Опасные производственные факторы (рабочее давление в реакторе синтеза)	$P=0,6$ МПа	P – атмосферное
Отходы производства: сточные воды, м ³ /т антипирена	3,27	1,80
Токсичность производимой продукции	III класс опасности (умеренно опасные вещества)	IV класс опасности (малоопасные вещества)

Кроме того, в отличие от новых антипиренов Фосполиол-II содержит в своем составе хлорорганические примеси.

Определение эффективности экспериментальных образцов антипиренов проводили в составе теплозащитной шпатлевки ВШ-27Ф. Шпатлевка представляет собой пастообразную смесь раствора полимерного связующего, минеральных наполнителей и катализатора отверждения и предназначена для защиты конструктивных элементов от воздействия теплового, газодинамического и аэродинамического потоков, работающих в интервале температур от -60 до +170 °С.

На основе двух экспериментальных образцов экологически безопасных антипиренов, полученных от ФГУП «ГосНИИОХТ», изготовлены экспериментальные образцы шпатлевки ВШ-27Ф и исследованы их свойства. Изготовление теплозащитной шпатлевки производили в соответствии с промышленной технологией.

Определение физико-механических и теплофизических свойств проводили в соответствии с ГОСТ 8420-74, ТУ 1-595-28-1401-2013, ГОСТ 56754-2015, ГОСТ 14760-69, ГОСТ 4651-2014, ГОСТ 31939-2012, ГОСТ 7076-99.

Характеристики пожарной опасности определяли согласно требованиям авиационных норм АП-25 Приложение F, Часть I (ОСТ1 90094-79, ГОСТ Р 57924-2017) – горючесть, Приложение F, Часть V (ГОСТ 24632-81) – дымообразование. Подробно данные методы испытаний и использованное оборудование описаны в работах [25, 26].

Определение эксплуатационных свойств теплозащитного покрытия на основе экспериментальной партии теплозащитной шпатлевки с Антипиреном 2 проводили по ММ 1.595-20-393-2009 (определение температурного перепада при одностороннем воздействии пламени с температурой 1050–1150 °С, ISO 11358, DIN 51006, ISO 11357 (синхронный термический анализ в интервале температур от 20 до 1600 °С).

Результаты

Для исследований, изготовили две экспериментальные партии шпатлевки типа ВШ-27Ф с различными антипиренами. На их основе получены экспериментальные образцы теплозащитного покрытия типа ВШ-27Ф и исследованы их технологические, физико-механические и теплофизические свойства. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства экспериментальных образцов шпатлевки ВШ-27Ф

Свойства	Значения свойств для шпатлевки ВШ-27Ф		
	с Фосполиолом-II	с Антипиреном 1	с Антипиреном 2
Условная вязкость по ВЗ-246, с (диаметр сопла 6 мм)	Не менее 60	75	85
Массовая доля нелетучих веществ, %	52–60	52	54
Кажущаяся плотность, г/см ³	0,63–0,87	0,64	0,80
Жизнеспособность, ч, при температуре 20±2 °С	6–8	4–5	6–8
Теплопроводность, Вт/(м·К), при 25–200 °С	0,10–0,18	0,13–0,24	0,10–0,18
Предел прочности при равномерном отрыве от алюминиевого сплава Д16 (разрушение когезионное), МПа	1,4–2,5	0,9–1,2	1,5–2,6
Предел прочности при сжатии, МПа	12,0–14,9	10,2–12,5	12,3–14,8
Горючесть – группа	Трудногоряющий	Самозатухающий	Трудногоряющий
Дымообразование – группа	Среднедымящий		

По результатам испытаний установлено, что уровень технологических и теплофизических свойств экспериментальных образцов шпатлевки ВШ-27Ф, изготовленных с использованием экологически безопасных антипиренов, соответствует аналогичным показателям для материала с Фосполиолом-П. Однако введение в композицию Антипирена 1 привело к снижению жизнеспособности, что, вероятно, объясняется его повышенной кислотностью по сравнению с Антипиреном 2. По дымообразованию образцы теплозащитной шпатлевки с исследуемыми антипиренами являются среднедымящими, однако по группе горючести композиция с Антипиреном 1 уступает составу с Фосполиолом-П, что, вероятно, связано с меньшим содержанием фосфора в его составе. Наблюдается также незначительное снижение механических свойств и ухудшение теплопроводности теплозащитной шпатлевки с Антипиреном 1. С учетом анализа проведенных испытаний шпатлевка с Антипиреном 2 выбрана для проведения комплексных исследований.

Определены теплофизические характеристики экспериментальных образцов теплозащитного покрытия с Антипиреном 2 в широком температурном интервале – от -25 до +200 °С. На рис. 1 и 2 представлены результаты проведенных исследований. Установлено, что удельная теплоемкость (среднее значение) в интервале температур от 50 до 90 °С составляет 1,64 Дж/(г·К), при подъеме со 100 до 170 °С – снижается до 1,25 Дж/(г·К), а затем при дальнейшем подъеме температуры со 180 до 200 °С – повышается до 1,27 Дж/(г·К). Кривые зависимости удельной теплоемкости от температуры теплозащитного покрытия ВШ-27Ф с Фосполиолом-П и Антипиреном 2 имеют одинаковый характер, однако в случае применения в составе Фосполиола-П существенного снижения теплоемкости в интервале температур от 100 до 170 °С не обнаружено.

Анализ результатов определения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) теплозащитной шпатлевки подтвердил типичный характер зависимости изменения ТКЛР от температуры, однако с Антипиреном 2 значения ТКЛР на 10–15% выше, чем для покрытия, содержащего Фосполиол-П. Как в случае с удельной теплоемкостью, так и в случае с ТКЛР данные незначительные расхождения в значениях могут быть связаны с многокомпонентностью и высокой наполненностью системы.

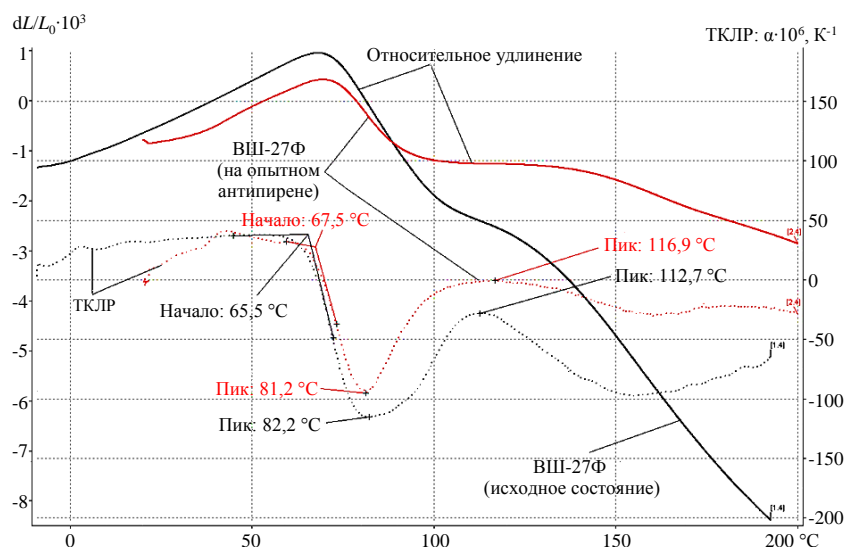


Рис. 1. Результаты определения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в интервале температур от 25 до 200 °С теплозащитного покрытия ВШ-27Ф с применением различных антипиренов

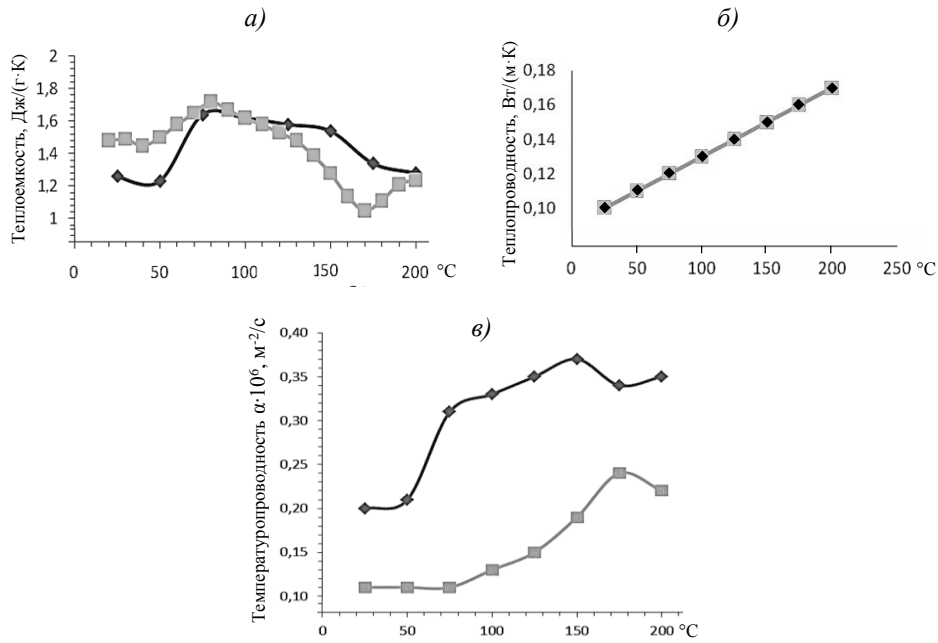


Рис. 2. Температурные зависимости удельной теплоемкости (а), теплопроводности (б) и температуропроводности (в) покрытий типа ВШ-27Ф с Фосполиолом-PI (◆) и Антипиреном 2 (■)

Введение нового антипирена не приводит к смещению коэффициента теплопроводности – повышение значений с 0,10 до 0,18 Вт/(м·К) с ростом температуры с 25 до 200 °С обусловлено природой полимерной матрицы.

Температуропроводность при подъеме температуры с 25 до 200 °С возрастает с $0,13 \cdot 10^{-6}$ до $0,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ в случае образца покрытия, содержащего Антипирен 2, что, вероятнее всего, объясняется бóльшим значением плотности образца с Антипиреном 2 по сравнению с образцом, содержащим Фосполиол-PI.

Проведены калориметрические измерения и синхронный термический анализ в интервале температур от 20 до 1000 °С составов с Антипиреном 2 и Фосполиолом-PI (рис. 3).

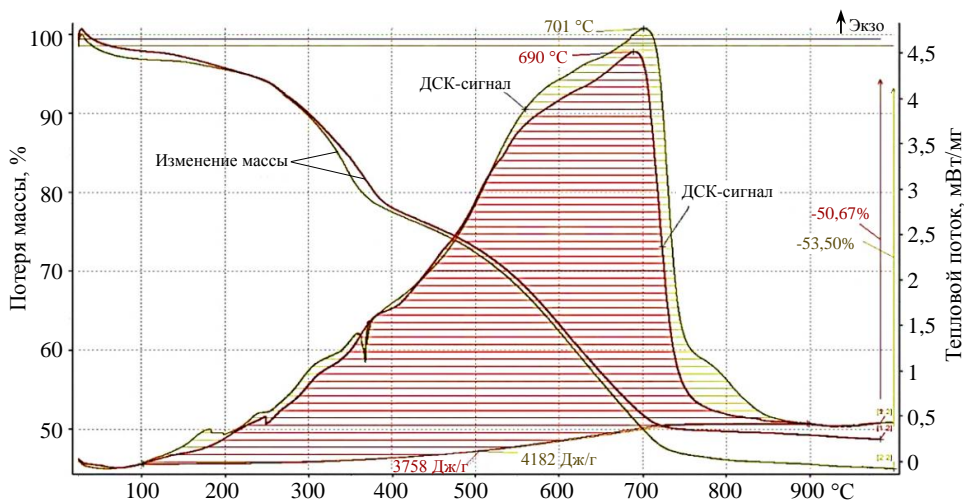


Рис. 3. Результаты синхронного термического анализа (термогравиметрические (ТГА) и калориметрические (ДСК) измерения) в интервале температур от 20 до 1000 °С покрытий ВШ-27Ф с Фосполиолом-PI (—) и Антипиреном 2 (—)

Установлено, что термоокислительное разложение материала идет в два этапа. Потеря массы 30% в области температур 233–390 °С связана с деструкцией входящих в состав полимерных компонентов материала ВШ-27Ф эпоксидной, фенолформальдегидной смол и сополимера винилхлорида с акрилонитрилом. Этот процесс сопровождается умеренным тепловым эффектом. На втором этапе разложения в области температур 400–670 °С потеря массы составляет еще 32% и связана с образованием коксового остатка, а также с частичным окислением углерода и сопровождается тепловым эффектом с максимумом при температуре 606 °С. Термохимические процессы, протекающие в материале при температурах от 690 до 1600 °С, связаны в основном с уплотнением кокса, образовавшегося в результате разложения связующего, и со структурными изменениями в наполнителях, входящих в состав композиции, сопровождающимися поглощением тепла.

Таким образом, абляционный (жертвенный) процесс разрушения теплозащитного материала ВШ-27Ф происходит на поверхности ТЗМ при температуре от 248 до 800 °С.

Замена Фосполиола-II в составе теплозащитного покрытия ВШ-27Ф на Антипирен 2 не приводит к смещению экзотермического процесса в область более высоких температур и снижению суммарной величины теплового эффекта.

Температуру на внешней стороне защищаемой поверхности в момент воздействия пламени с температурой 1050–1150 °С определяли на образцах, состоящих из алюминиевого сплава Д16-АТ толщиной 2 мм с нанесенным на него слоем теплозащитной шпатлевки ВШ-27Ф, содержащей экологически безопасный Антипирен 2.



Рис. 4. Образец теплозащитного покрытия типа ВШ-27Ф с Антипиреном 2 после воздействия пламени с температурой 1100 °С в течение 15 мин

Установлено, что в момент воздействия пламени с температурой 1050–1150 °С на теплозащитное покрытие перепад температуры на конструктивном элементе составлял 710–800 °С. Температура на внешней стороне образца зависит от толщины покрытия: при толщине 1,2–2,0 мм она составляет 330–340 °С, при толщине 3,5 мм – снижается до 195–220 °С. После испытаний покрытие не имеет расслоений и пузырей. На поверхности образца имеются мелкие трещины, образовавшиеся вследствие деформации подложки при охлаждении (рис. 4).

Обсуждение и заключения

Анализ полученных результатов показал, что физико-химические характеристики антипирена оказывают существенное влияние на свойства теплозащитного покрытия на основе серийно выпускаемой шпатлевки ВШ-27Ф. Так, подтверждены результаты, полученные в работе [18], о влиянии кислотности исследуемых антипиренов на технологические свойства шпатлевки. Для получения

требуемой, удобной для нанесения, жизнеспособности состава подходят антипирены с более низкой кислотностью (Антипирен 2). Жизнеспособность теплозащитной шпатлевки имеет большое значение из-за длительной межслойной сушки покрытия.

Повышенное содержание фосфора в составе Антипирена 2 (12,66%) дало возможность изготовить теплозащитное покрытие, имеющее пониженную горючесть.

По результатам проведенных испытаний экспериментальных образцов шпатлевки типа ВШ-27Ф, композиция, изготовленная с использованием Антипирена 2, содержащего 12,66% фосфора, выбрана для проведения расширенных исследований.

Исследованы теплофизические и эксплуатационные свойства экспериментальных образцов ТЗМ с Антипиреном 2 в интервале температур 25–200 °С (удельная теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность). Установлено, что теплозащитное покрытие ВШ-27Ф с Антипиреном 2 по температуропроводности, ТКЛР, тепловому эффекту и температурному интервалу выделения тепла схоже по характеристикам с покрытием с Фосполиолом-II. Температура на внешней поверхности испытываемого образца определяется толщиной покрытия: температура 330–340 °С обеспечивается толщиной 1,2–2,0 мм, а увеличение толщины покрытия до 3,5 мм приводит к снижению температуры до 195–220 °С.

Установлено, что теплозащитные функции покрытия ВШ-27Ф до 200 °С определяются его теплофизическими характеристиками; выше 200 °С температурный перепад происходит за счет абляции – интенсивного термоокислительного разложения и уноса материала, протекающего в области температур от 200 до 689 °С, и сопровождается экзотермическим эффектом.

Показана возможность замены Фосполиола-II в составе теплозащитной шпатлевки на экологически безопасный фосфорсодержащий Антипирен 2. По совокупности теплофизических, физико-механических, технологических и огневых свойств шпатлевка ВШ-27Ф с Антипиреном 2 находится на уровне шпатлевки ВШ-27Ф с Фосполиолом-II, однако имеет квоту превосходства по повышенной экологической безопасности технологического процесса изготовления.

Полученные положительные результаты свидетельствуют о целесообразности продолжения исследований в области применения экологически безопасных антипиренов в составе полимерных материалов и покрытий.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ГосНИИОХТ» С.А. Жесткову, М.Е. Жидкову, Е.А. Фокину за разработку новых экологически безопасных фосфорорганических антипиренов, а также сотруднице ФГУП «ВИАМ» Н.И. Швец за ведение данной научно-исследовательской работы.

Библиографический список

1. Шмидт Д.Л. Абляция // Конструкционные свойства пластмасс (физико-химические основы применения) / под ред. Э. Бэра. М.: Химия, 1967. С. 401–456.
2. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
3. Панкратов Б.М. Спускаемые аппараты. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.
4. Авдучевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.Л. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
5. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aircraft engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
6. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.

7. Гращенко Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
8. Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер М. Добавки к полимерам: справочник. СПб.: Профессия, 2010. 1144 с.
9. Ткачук А.И., Афанасьева Е.А. Реакционноспособные антипирены для эпоксидных смол. Часть 2 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2020. №4–5 (88). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-13-21.
10. Чижова М.А., Хайруллин Р.З. Токсичность продуктов горения полимерных материалов при введении в их состав антипиренов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. №9. С. 144–145.
11. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
12. Torre L., Kenny J.M., Maffezzoli A.M. Degradation behavior of a composite material for thermal protection systems. Part I. Experimental characterization // *Journal of Material Science*. 2010. Vol. 33. No. 12. P. 3137–3143.
13. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
14. Лукина А.И., Парахин И.В. Теплозащитные свойства гетероциклоцепных полимеров // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №11 (47). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-4-4.
15. Chanda M., Roy S.K. Industrial polymer, specialty polymers, and their applications. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 432 p.
16. Gren M. Flame Retardant Chemicals: Technologies and Global Markets / BCC Research. 2015. 164 p.
17. Polymer Green Flame Retardant / ed. C.D. Papaspyrides, P. Kiliaris. Elsevier, 2014. 943 p.
18. Серкова Е.А., Застрогина О.Б., Барботько С.Л. Исследование возможности использования новых экологически безопасных фосфорорганических антипиренов в составе связующих для пожаробезопасных материалов интерьера // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №2 (74). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-24-34.
19. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморективные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
20. Машляковский Л.Н., Лыков А.Д., Репкин В.Ю. Органические покрытия пониженной горючести: учеб. для вузов. Л.: Химия, 1989. 184 с.
21. Венедиктова М.А., Петрова А.П., Брык Я.А., Краснов Л.Л. Исследование возможности применения новых экологически безопасных антипиренов в составе полимерной теплозащитной шпатлевки // *Тезисы докладов Всерос. науч.-техн. конф. «Термопластичные материалы и функциональные покрытия»*. М., 2019. С. 55–68.
22. Организация по запрещению химического оружия // *Конвенция о химическом оружии*. URL: <http://www.opcw.org/ru> (дата обращения: 01.07.2020).
23. Койтов С.А., Мельников В.Н. Анализ теплофизических свойств полимеров с целью выбора оптимального композиционного материала теплозащитного покрытия летательного аппарата // *Вестник ЮУрГУ*. 2012. №12. С. 194–198.
24. 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.
25. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
26. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. с поправками 1–6. М.: Авиаиздат, 2009. 274 с.