

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-161-173

ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ТКАНЕПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

К.В. Макрушин¹, А.А. Баранников¹, И.А. Ищенко¹, М.М. Платонов², А.Н. Бабин²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр «Современные полимерные материалы», Москва, Россия; info@nic-spm.ru

Аннотация. Показаны основные способы достижения пожаробезопасности тканепленочных материалов, предназначенных для изготовления гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха. Пожаробезопасность данных изделий является одним из основных требований для обеспечения безопасности летательных аппаратов, применяющих системы кондиционирования воздуха. Приведены сведения о влиянии химической структуры полимерных покрытий на пожаробезопасность гибких воздухопроводов. Рассмотрены различные варианты антипиренов. Даны подробная информация, ее анализ и выводы по изученному вопросу.

Ключевые слова: тканепленочные материалы, гибкие трубопроводы, системы кондиционирования воздуха, пожаробезопасность, требования, антипирены

Для цитирования: Макрушин К.В., Баранников А.А., Ищенко И.А., Платонов М.М., Бабин А.Н. Пути достижения пожаробезопасности тканепленочных материалов, применяемых для изготовления гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 161–173. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-161-173.

Scientific article

WAYS TO ACHIEVE FIRE SAFETY OF FABRIC-FILM MATERIALS USED IN THE MANUFACTURING OF FLEXIBLE AIR CONDITIONING PIPELINES

K.V. Makrushin¹, A.A. Barannikov¹, I.A. Ishchenko¹, M.M. Platonov², A.N. Babin²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Limited Liability Company «Scientific Research Center «Modern Polymer Materials», Moscow, Russia; info@nic-spm.ru

Abstract. This article presents the key methods for achieving fire safety in fabric-film materials used for the manufacture of flexible ducts for air conditioning systems in aircraft. Fire safety for these products is a key requirement and is essential for the safety of aircraft using air conditioning systems. This article provides information on the influence of the chemical structure of polymer coatings on flexible air ducts' fire safety. Various flame retardant options are discussed. Detailed information, its analysis, and conclusions on the issue under study are provided.

Keywords: fabric-film materials, flexible ducts, air conditioning systems, fire safety, requirements, flame retardants

For citation: Makrushin K.V., Barannikov A.A., Ishchenko I.A., Platonov M.M., Babin A.N. Ways to achieve fire safety of fabric-film materials used in the manufacturing of flexible air conditioning pipelines. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 161–173. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-161-173.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации ведется ряд разработок новой перспективной авиационной техники. Однако для ее серийного освоения следует решить важную задачу по импортозамещению материалов. В этой связи необходим качественный скачок в области материаловедения по разработке и внедрению в производство современных материалов, к которым относятся тканепленочные материалы (ТПМ), используемые для изготовления гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха (СКВ).

Гибкие трубопроводы СКВ широко применяются в конструкциях летательных аппаратов. Основное назначение СКВ – это поддержание комфортных условий жизнедеятельности для членов экипажа и пассажиров. Очевидно, что свойства разреженной атмосферы, особенно в условиях больших высот полета летательного аппарата, не подходят для нормального функционирования организма человека. Следовательно, основными задачами СКВ являются обеспечение искусственного климата в кабинах и салонах летательных аппаратов, поддержание оптимальных значений влажности и температуры воздуха [1, 2]. В ранее разработанных и серийно производимых конструкциях летательных аппаратов трубопроводы СКВ в основном изготавливали из сплавов на основе алюминия. Но уже в 1970-е гг. в передовых отраслях техники стали широко применяться полимерные композиционные материалы. В первую очередь эта тенденция нашла широкое применение при разработке и создании авиационной и космической техники [3–5]. Основные преимущества использования полимерных композиционных материалов в трубопроводах СКВ перед традиционными металлическими конструкциями – значительное снижение массы, повышение коррозионной стойкости и ресурса трубопроводов и летательных аппаратов [6]. Трубопроводы СКВ из полимерных композиционных материалов могут изготавливаться в виде жестких элементов круглого, овального или коробчатого сечения. Но с целью снижения трудоемкости монтажа и обеспечения размещения трубопроводов в местах, где проходят различные коммуникации (жгуты, гидравлические и топливные системы), предпочтительно применение гибких воздухопроводов [7]. Внешний вид гибкого воздуховода СКВ показан на рис. 1.

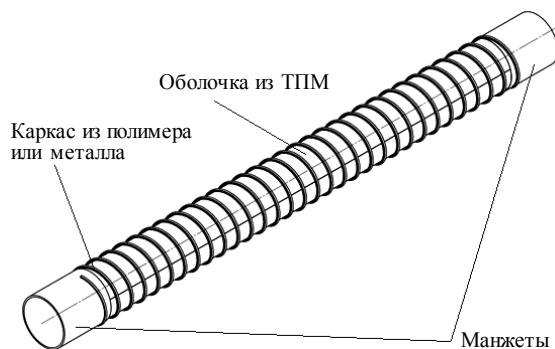


Рис. 1. Схема гибкого воздуховода системы кондиционирования воздуха (ТПМ – тканепленочный материал)

Необходимо отметить, что в настоящее время гибкие воздухопроводы СКВ широко используются в зарубежных самолетах и вертолетах, а в Российской Федерации наблюдается отставание в этой важной области [8]. К гибким воздуховодам предъявляют основные требования по минимальной массе, необходимой прочности, безопасности для здоровья человека и пожаробезопасности [9]. Имеется значительный выбор пожаробезопасных материалов для армирующего спирального каркаса (металл, шнуры из арамида или стекловолокна, термостойкие полимеры). Создать легкий и прочный

пожаробезопасный ТПМ гораздо труднее. По этой причине поставлена задача по созданию отечественных пожаробезопасных ТПМ, применяемых в качестве оболочки гибких воздуховодов СКВ и не уступающих по своим свойствам зарубежным аналогам.

Материалы и методы

Пожаробезопасность – это комплексное свойство, которое зависит от химического состава, структуры, термической стабильности, конструкции материала и условий горения.

В настоящее время, согласно государственным (федеральным) авиационным нормам, к материалу СКВ предъявляют требования только по ограничению горючести (воспламеняемости). Наиболее жесткие требования по пожаробезопасности предъявляют к материалам, применяемым в пассажирских салонах воздушных судов, к которым относится и ТПМ [10]. Такие материалы должны соответствовать требованиям, изложенным в п. 25.853 (а) авиационных норм при испытаниях методом, описанным в Части I Приложения F. Сущность метода испытаний заключается в воздействии пламени лабораторной газовой горелки Бузена или Торрилла в течение 12 с на вертикально расположенный образец и регистрации продолжительности остаточного (самостоятельного) горения, длины прогорания и продолжительности горения падающих капель.

Основные свойства ТПМ как композита зависят от свойств исходных материалов – тканевой основы и резиноподобного полимерного покрытия. Кроме минимальной массы и пожаробезопасности, к ТПМ также предъявляют требования к химической инертности. В качестве тканевой основы для пожаробезопасных ТПМ наиболее перспективными являются стеклоткани, которые имеют ряд преимуществ – высокую удельную прочность при минимальной массе, гибкость, влагоустойчивость, стойкость к воздействию агрессивных сред, сопротивление горению, теплоизоляционные и диэлектрические свойства, а также экологическую безопасность [11].

При выборе исходных материалов для ТПМ с учетом необходимости выполнения комплекса требований по пожаробезопасности, гибкости, безопасности для персонала, химической стабильности в первую очередь можно обратить внимание на полимеры с кремнийорганической основой.

В первую очередь на пожаробезопасность покрытий на основе кремнийорганического полимера влияют термические свойства. В таких полимерах наличие стабильных химических связей типа Si–O и Si–C обеспечивает более высокий уровень термостойкости и устойчивости к окислению по сравнению со связями типа C–C в органических смолах. Показателем данной стабильности может быть теплота образования химической связи. Например, для полидиметилсилоксана (ПДМС) теплота образования связи типа Si–O составляет 452 кДж/моль, а в органических смолах для связи типа C–C этот показатель колеблется от 318 до 352 кДж/моль.

Кремнийорганические полимеры также отличаются превосходной термической стойкостью [12], например температура вспышки чистого ПДМС превышает 300 °C в зависимости от молекулярной массы.

При термическом разложении ПДМС наблюдается незначительная скорость тепловыделения, обычно в пределах 60–150 кВт/м² [13]. При горении ПДМС происходит выделение SiO₂, CO₂ и H₂O. Таким образом, можно утверждать, что при горении соединений кремния не выделяются токсичные и агрессивные вещества. Кроме того, получаемая в результате такого горения пыль диоксида кремния имеет высокий уровень диэлектрических свойств и образует дополнительную термозащиту [14].

Содержащиеся в кремнийорганических покрытиях вспомогательные вещества (например, модификаторы, усиливающие адгезию) также могут влиять на пожаробезопасность ТПМ. В работе [15] показано положительное влияние наполнителей, например мусковита, на термостойкие свойства кремнийсодержащих покрытий. Получены керамические слои после сжигания составов на основе кремнийорганического полимера при температуре 1050 °С.

Зачастую на пожаробезопасность влияет структура материала, например, термическая стойкость ТПМ может снижаться из-за образования «карманов» между слоями ткани и покрытия. В них могут накапливаться легковоспламеняющиеся продукты термического разложения, снижающие пожаробезопасность [16].

Пожаробезопасные свойства ПДМС при тепловом разрушении в основном зависят от количества и типа концевых групп, наличия примесей каталитических веществ в полимерном покрытии [17]. Молекулярная масса ПДМС может влиять на процесс термической деполимеризации наряду со случайными расщеплениями цепи. В работе [18] сделан вывод, что наличие метильных групп в ПДМС значительно повышает термостойкость по сравнению с ПДМС с гидроксильными группами. Продукты разложения при этом содержат циклические олигомеры силоксана.

Авторы работы [19] предположили, что винильные концевые группы изменяют механизм термического разложения, в отличие от метильных групп. В работе [20] сделан вывод, что циклические олигомеры типа гексаметилциклотрисилоксана и октилметилциклотетрасилоксана являются продуктами термического разложения ПДМС, содержащего концевые винильные группы.

В работе [21] показано, что при термическом разложении полидиметилдифенилсилоксана имеет место корреляция между массой твердого остатка и содержанием фенильных групп. Возможно также дополнительное сшивание с помощью группы Si–H в начале термической деструкции, что показано на примере ПДМС, которые содержат метилсилоксановые фрагменты [22]. Выявлено, что их термостойкость повышается при увеличении плотности сшивки.

Комплексы платины, иридия и родия, используемые в качестве катализаторов для реакций сшивания ПДМС, оказывают явное влияние на повышение пожаробезопасности. Обычно они используются в количестве <(10–50) ppm. При термоокислении эти металлы катализируют образование метиленовых мостиков как внутри, так и между молекулами, что приводит к увеличению плотности сшивки и, следовательно, к снижению восприимчивости к термоокислению [23].

Результаты исследований показывают, что оксиды переходных металлов, таких как Fe, Ti, Zr, Ce, Zn, повышают устойчивость к высоким температурам и, следовательно, обеспечивают пожаробезопасность полимерного состава. В частности, в работе [24] указано, что для повышения термостойкости покрытий подушек безопасности, содержащих ПДМС, добавляют смеси оксидов CeO, FeO, Fe₂O₃ и TiO₂.

Результаты и обсуждение

Анализ научно-технической информации позволил сделать вывод, что наиболее простым способом достижения пожаробезопасности ТПМ является использование специализированных наполнителей-антипиренов. Для жидких кремнийорганических смесей антипирены обычно вводятся посредством простого процесса смешивания. Следует отметить, что системы антипиренов должны выбираться с учетом температуры обработки и термодеструкции кремнийорганического состава. Например, для композиций с температурой вулканизации >150 °С необходимо выбирать антипирены, имеющие

температуру разложения выше температуры обработки и примерно соответствующую температуре термодеструкции для предотвращения их разложения.

Использование галогенсодержащих антипиренов, несмотря на высокую эффективность, ограничено ввиду их низкой экологичности и высокой токсичности продуктов деструкции.

В настоящее время широко используются неорганические, вспучивающиеся, фосфорные/азотные/кремниевые и наноантипирены. Имеются практические примеры их применения в кремнийорганических композициях для изготовления пожаробезопасных материалов.

Антипирены на основе фосфора считаются эффективными безгалогеновыми антипиренами [25]. Они могут оказывать действие одновременно в конденсированной и газовой фазе. В конденсированной фазе высвобождаемая полифосфорная кислота способствует дегидратации и карбонизации полимерной матрицы, обеспечивая образование обуглероженного пенококса, что создает эффект физического барьера. Между тем в газовой фазе свободные радикалы, образующиеся из антипиренов на основе фосфора (PO^{-1} , HPO_2^{-1} и HPO^{-1}), реагируют со свободными радикалами полимерных молекул. Это взаимодействие обрывает цепные реакции окисления, что еще больше затрудняет горение, осуществляемое с помощью свободных радикалов [26].

Для кремнийорганических полимеров трудно добиться хорошей антипирлирующей способности путем добавления отдельных антипиренов на основе фосфора. Обычно антипирены, содержащие фосфор, обладают плохой термической стабильностью и водостойкостью, в то время как кремнийорганические полимеры применяются в высокотемпературных и высоковлажностных средах. Кроме того, продукты горения кремнийорганического полимера являются пористыми и рыхлыми, что делает этот антипирен неэффективным в конденсированной фазе для замедления горения [27].

Термозащитное действие азотсодержащих антипиренов, в отличие от фосфорсодержащих, в основном реализуется за счет газовой фазы. При достижении определенной температуры они начинают разлагаться на низкомолекулярные производные и выделять негорючие газы, например NH_3 . Этот процесс поглощает большое количество тепла, тем самым снижая температуру поверхности полимерной подложки. Кроме того, образующиеся негорючие газы могут снижать концентрацию горючих парообразных продуктов, выделяемых из полимера и окружающего кислорода [28].

Авторы работы [29] использовали цианурат меламина для получения термостойкого кремнийорганического состава и исследовали его свойства в процессе термического старения. Результаты показали, что введение цианурата меламина снижает стойкость к термическому старению. Однако остаточная масса увеличивается на ~10 % из-за реакции сшивания цепи в результате образования неорганических кремнийсодержащих продуктов. Кроме того, продемонстрировано, что цианурат меламина хорошо сочетается с кремнийорганическими соединениями, и реакция сшивания происходит между свободными радикалами и кислородом при высоких температурах, что значительно улучшает устойчивость к термическому старению.

Антипирены на основе кремния являются экологически чистыми, так как кремнийорганические вещества обладают низкой токсичностью. Полимеры с антипиренами на основе кремния в процессе горения могут генерировать наночастицы SiO_2 . Низкая поверхностная энергия позволяет такому нанокремнезему осаждаться на поверхности полимера вместе с другими продуктами разложения с образованием гибридного керамического слоя [30].

Этот защитный слой может ограничивать перенос тепла, горючего газа и кислорода, что дополнительно защищает внутренний слой полимера от дальнейшего термического разложения и горения. Полиэдральные олигомерные силсесквиоксаны

(ПОСС) – тип антипирена на основе кремния, который представляет собой наноразмерные гибридные молекулы в форме клетки, состоящие из кремния и кислорода с жестким полым ядром из кремния. Такая структура способствует формированию термической стабильности и антиокислительных свойств полимеров [30, 31]. Это самые маленькие частицы кремния (от 1 до 3 нм), которые можно получить. Функциональные группы, присутствующие на краях структуры в форме клетки, можно рационально спроектировать для улучшения совместимости на границе раздела с полимерами, что позволяет включать ПОСС в качестве реактивных компонентов в полимерную матрицу. В настоящее время ПОСС и их производные применяются для улучшения механических и термических свойств, а также для достижения пожаробезопасности различных полимеров, включая кремнийсодержащие [32].

В настоящее время фосфорно-азотные антипирены являются наиболее распространенными и широко используемыми системами для достижения высокоэффективной термостойкости полимеров. Эти антипирены обычно обеспечивают комбинированную газовую и конденсированную фазовую термостойкость [33–35]. Они обладают такими преимуществами, как низкий уровень дымообразования, токсичности и противокapельные свойства.

Введение подобных антипиренов эффективно повышает термостойкость и кремнийорганических композиций. При добавлении 30 частей гекса(п-ацетамидофеноксид)циклотрифосфазена на 100 частей кремнийорганического каучука композиты имели классификацию V-0 по методу испытаний UL-94, а тепловыделение и дымообразование снизились на ~27 и ~42 % соответственно. Кроме того, результаты испытаний подтвердили, что гекса(п-ацетамидофеноксид)циклотрифосфазен влияет на формирование защитных слоев и улавливание свободных радикалов [36].

Неорганические антипирены обеспечивают требуемую пожаробезопасность за счет снижения доли горючих продуктов, изменения теплопроводности и других свойств полимерных матриц. В покрытиях на основе полисилоксанов наиболее широко используются неорганические антипирены, такие как гидроксиды магния и алюминия, слоистые двойные гидроксиды, оксиды металлов и др. [37–39].

Гидроксиды металлов, например магния и алюминия, обычно используются в качестве термостойких наполнителей для различных полимеров благодаря низкой стоимости и нетоксичности дыма. Они могут снижать концентрацию кислорода, поглощать тепло и способствуют образованию защитного слоя сажи. К сожалению, при практическом применении для достижения полной пожаробезопасности силоксановых полимеров требуется высокое наполнение, что ухудшает их механические свойства. Поэтому необходимо улучшить адгезию и дисперсию металлических гидроксидов в кремнийорганических эластомерах для повышения термостойкости.

Вулканизированные при комнатной температуре кремнийорганические составы широко применяются в качестве электроизоляционного материала. Использование гидроксида алюминия в составе кремнийорганических компаундов обычно обеспечивает хорошие электроизоляционные свойства, но термостойкость при небольшом наполнении таких материалов низкая [40].

Авторы работы [41] получили силиконовый компаунд, заполненный гидроксидом алюминия, с графеновыми нанопластинами. Результаты исследований показали, что введение графеновых нанопластин в силикон, содержащий гидроксид алюминия, значительно повысило стойкость к горению, сохранив при этом электроизоляционные свойства на приемлемом уровне.

Оксиды металлов обычно используются для повышения термической стабильности полимеров. Для получения необходимой пожаробезопасности могут применяться также другие синергические антипирены.

Авторы работы [42] использовали вспучивающийся огнестойкий состав (состоящий из фосфорной кислоты, меламина и пентаэритрита) и Fe_2O_3 в качестве дымоподавляющего агента в силоксановых компаундах. Результаты исследований показали, что Fe_2O_3 может усиливать эффект дымоподавления и повышать температуру термической деструкции. Оксид железа способствует ранней реакции сшивания полимера во время разложения, что интенсифицирует образование сажи. Целостность слоя нанокремнезема определяет эффективность защиты, поскольку он может действовать как идеальный физический барьер, блокируя передачу тепла и внешнего кислорода к полимеру, тем самым ограничивая дальнейшее горение внутренних слоев полимерных матриц. Комбинированные катализаторы не только увеличивают выход сажи, но и улучшают структуру ее пористого слоя, значительно повышая пожаробезопасность и дымоподавляющие свойства кремнийорганического полимера.

На основании изложенного можно сделать вывод, что классический подход к обеспечению пожаробезопасности кремнийорганических полимеров за счет использования антипиренов продолжает активно развиваться.

Как указано ранее, галогенсодержащие антипирены опасны для экологии и токсичны. Поэтому заметна тенденция разработки безгалогеновых термостойких полимерных материалов. Фосфор- и азотсодержащие добавки усиливают пожаробезопасность за счет фазовых и газовых воздействий, однако по отдельности антипирены на основе P, N или Si не достигают высокой эффективности. Хотя синергетические антипирены на основе фосфора и азота демонстрируют высокую термостойкость, процесс их получения трудоемкий с небольшим выходом конечного продукта. Эти добавки также демонстрируют плохую совместимость с кремнийорганической матрицей, что отрицательно сказывается на механических свойствах материала.

Платина или соединения платины обладают хорошей каталитической эффективностью, так как этот элемент влияет на образование поперечных сшивок при термическом разложении. Однако стоимость таких добавок высока. Кроме того, их отдельное использование не позволяет достичь высокого кислородного индекса для кремнийорганического полимера, поэтому их следует комбинировать с другими антипиреновыми добавками.

Наноантипирены, используемые в небольшом количестве, обеспечивают высокую эффективность и минимальное воздействие на механические свойства кремнийорганического эластомера. Однако предотвращение образования агломератов и обеспечение равномерного распределения наноматериалов в матрице представляют значительные проблемы. Достижения в области модификации поверхности для улучшения совместимости нанонаполнителя и матрицы имеют решающее значение. Несмотря на значительный прогресс, идеальной антипиреновой системы для кремнийорганических полимеров пока не существует, поскольку каждая из них имеет преимущества и недостатки.

На основании проведенного информационного обзора можно сделать вывод, что наиболее привлекательным антипиреном в составе полимерного покрытия для ТПМ СКВ является гидроксид алюминия с аппретированной поверхностью, так как материал прежде всего должен быть экологичным и безопасным для здоровья человека. Это одно из наиболее важных условий применения ТПМ в составе гибких воздуховодов, обеспечивающих кондиционирование воздуха в самолете. Данный материал также стабилен при температуре эксплуатации, имеет низкую стоимость, производится на территории РФ в широком ассортименте [43]. Недостатками материала

являются невысокая эффективность как антипирена и необходимость высокого наполнения (>100 %) кремнийорганического полимера, что приводит к снижению прочностных характеристик.

Заключения

По техническому заданию НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ силами ООО «НИЦ «Современные полимерные материалы» и ООО «Химпродукт» проведены исследования. На основе полученных результатов и данных анализа научно-технической информации разработаны технические требования к новому отечественному ТПМ. Выработаны экспериментальные технологические режимы, по которым изготовлены и испытаны опытные образцы ТПМ, не уступающего импортным аналогам, в том числе по пожаробезопасности. Опытный пожаробезопасный ТПМ представляет собой стеклоткань с односторонним покрытием на основе эластичного термоотверждаемого кремнийорганического клея, содержащего гидроксидный антипирен, красный термостойкий пигмент на основе оксида железа и модификаторы адгезии и реологии.

Внешний вид отечественного опытного пожаробезопасного ТПМ показан на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид опытного пожаробезопасного тканепленочного материала

Отечественный опытный ТПМ можно рекомендовать для изготовления гибких трубопроводов в составе СКВ воздушных судов, работоспособных в интервале температур от –60 до +200 °С.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашений № 075-11-2024-006 и № 075-11-2025-010 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 04 июля 2023 г. № 1789-р об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу ООО «Химпродукт» за выполнение исследований по отработке технологических режимов изготовления экспериментальных и опытных партий нового отечественного ТПМ.

Список источников

1. ГОСТ 22607–77. Системы кондиционирования воздуха самолетов и вертолетов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1977. 7 с.
2. Ткачева В.Р., Галка Г.А. Обзор существующих систем кондиционирования воздушных судов // Молодой ученый. 2016. № 23 (127). С. 91–95.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
6. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиационно-космической техники // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
7. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 63–73. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
8. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. № 2. С. 4–9.
9. Иванов М.С., Павлюкович Н.Г., Донских И.Н., Морозова В.С. Влияние эксплуатационных факторов на свойства тканепленочного материала для воздухопроводов низкого давления системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). С. 118–127. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-118-127.
10. Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Барботько С.Л., Баранников А.А. Исследование горючести, дымообразования и токсичности в процессе горения полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых конструкций на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). С. 73–85. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.
11. ГОСТ 19907–2015. Ткани электроизоляционные из стеклянных крученых комплексных нитей. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
12. Dvornic P.R. Thermal properties of polysiloxanes in Silicon-Containing Polymers // The Science and Technology of Their Synthesis and Applications / Eds. R.G. Jones, W. Ando, J. Chojnowski. Springer, 2000. P. 185–213.
13. Buch R.R. Rates of heat release and related fire parameters for silicones // Fire Safety Journal. 1991. Vol. 17. P. 1–12.
14. Hsieh F.Y. Shielding effects of silica-ash layer on the combustion of silicones and their possible applications on the fire retardancy of organic polymers // Fire and Materials. 1998. Vol. 22. P. 69–76.
15. Mansouri J., Burford R.P., Cheng Y.B., Hanu L. Formation of strong ceramified ash from silicone-based compositions // Journal of Materials Science. 2005. Vol. 40. P. 5741–5749.
16. David C.T. Silicone Rubber Flame Resistance // Proceedings of the Hose Manufacturer Conference. Hague, 2007. P. 14.
17. Dvornic P.R. High Temperature Stability of Polysiloxanes in Silicon Compounds: Silanes and Silicones // Gelest Catalog. Morrisville, 2004. P. 419–432.
18. Grassie N., Macfarlane I.G. The thermal degradation of polysiloxanes. I. Poly(dimethylsiloxane) // European Polymer Journal. 1978. Vol. 14. P. 875–884.
19. Jovanovic J.D., Govedarica M.N., Dvornic P.R., Popovic I.G. The thermogravimetric analysis of some polysiloxanes // Polymer Degradation and Stability. 1998. Vol. 61. P. 87–93.

20. Deshpande G., Rezac M.E. The effect of phenyl content on the degradation of poly(dimethyl diphenyl) siloxane copolymers // *Polymer Degradation and Stability*. 2001. Vol. 74. P. 363–370.
21. Grassie N., Francey K.F., Macfarlane I.G. The thermal degradation of polysiloxanes. Part 4: Poly(dimethyl/diphenyl siloxane) // *Polymer Degradation and Stability*. 1980. Vol. 2. P. 67–83.
22. Hadayashida K., Tsuge S., Ohtani H. Flame retardant mechanism of polydimethylsiloxane material containing platinum compound studied by analytical pyrolysis technique and alkaline gas chromatography // *Polymer*. 2003. Vol. 44. P. 5611–5616.
23. Silicone Coated Base Material and Air Bag Base Material: pat. US 5529837A; appl. 27.02.95; publ. 25.06.96.
24. Zhou X., Qiu S.L., Mu X.W. et al. Polyphosphazenes-based flame retardants: A review // *Composites. Part B: Engineering*. 2020. Vol. 202. P. 108397.
25. Cai W., Lin B., Qi L. et al. Bio-based and fireproof radiative cooling aerogel film: Achieving higher sustainability and safety // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 488. P. 150784.
26. Shen S., Xin Y., Niu Z. et al. Phosphazene derivative cross-linked liquid silicone rubber and its mechanical and thermal properties // *Polymer Degradation and Stability*. 2022. Vol. 203. P. 110086.
27. Cao C.F., Yu B., Huang J. et al. Biomimetic, Mechanically Strong Supramolecular Nanosystem Enabling Solvent Resistance, Reliable Fire Protection and Ultralong Fire Warning // *ACS Nano*. 2022. Vol. 16. P. 20865–20876.
28. Huang X., Tian Z., Zhang D. et al. The synergetic effect of antimony (Sb_2O_3) and melamine cyanurate (MCA) on the flame-retardant behavior of silicon rubber // *Polymer Bulletin*. 2020. Vol. 78. P. 185–202.
29. Zhou C., Wang J., Li J., Shi J. Thermal aging properties of flame retardant silicone rubber based on melamine cyanurate // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 138. P. 49919.
30. Wu T., Qiu J., Lai X. et al. Effect and mechanism of hepta-phenyl vinyl polyhedral oligomeric silsesquioxane on the flame retardancy of silicone rubber // *Polymer Degradation and Stability*. 2019. Vol. 159. P. 163–173.
31. Wu Q., Gong L.-X., Li Y. et al. Efficient Flame Detection and Early Warning Sensors on Combustible Materials Using Hierarchical Graphene Oxide/Silicone Coatings // *ACS Nano*. 2018. Vol. 12. P. 416–424.
32. Rybiński P., Syrek B., Bradło D., Żukowski W. Effect of POSS Particles and Synergism Action of POSS and Poly-(Melamine Phosphate) on the Thermal Properties and Flame Retardance of Silicone Rubber Composites // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 1298.
33. Zhang W., Camino G., Yang R. Polymer/polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) nanocomposites: An overview of fire retardance // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 77–125.
34. Gao X., Liu H., Wei H. et al. Effect of incompletely condensed tri-silanol-phenyl-POSS on the thermal stability of silicone rubber // *Polymer Bulletin*. 2018. Vol. 76. P. 2835–2850.
35. Yaoke D., Yuan Z., Wang J. Synthesis of a phosphorus-containing trisilanol POSS and its application in RTV composites // *e-Polymers*. 2018. Vol. 18. P. 237–245.
36. Zhu C., Deng C., Cao J.-Y., Wang Y.-Z. An efficient flame retardant for silicone rubber: Preparation and application // *Polymer Degradation and Stability*. 2015. Vol. 121. P. 42–50.
37. Konstantinova A., Yudaev P., Orlov A. et al. Aryloxyphosphazene-Modified and Graphite-Filled Epoxy Compositions with Reduced Flammability and Electrically Conductive Properties // *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7. P. 417.
38. Bornosuz N.V., Gorbunova I.Y., Kireev V.V. et al. Synthesis and Application of Arylaminophosphazene as a Flame Retardant and Catalyst for the Polymerization of Benzoxazines // *Polymers*. 2021. Vol. 13. P. 263.
39. Orlov A., Konstantinova A., Korotkov R. et al. Epoxy Compositions with Reduced Flammability Based on DER-354 Resin and a Curing Agent Containing Aminophosphazenes Synthesized in Bulk Isophoronediamine // *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 3592.
40. Yang J., Ma W., Hu D. et al. Facile preparation and flame retardancy mechanism of cyclophosphazene derivatives for highly flame-retardant silicone rubber composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 138. P. 50297.

41. Nazir M.T., Khalid A., Kabir I. et al. Flame Retardancy and Excellent Electrical Insulation Performance of RTV Silicone Rubber // *Polymers*. 2021. Vol. 13. P. 2854.
42. Chen X., Li M., Zhuo J. et al. Influence of Fe₂O₃ on smoke suppression and thermal degradation properties in intumescent flame-retardant silicone rubber // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. Vol. 123. P. 439–448.
43. Гидроксид алюминия ФРАМИАЛ // ЗАО «ГЕОКОМ». URL: <https://geokom.com/ru/framial/> (дата обращения: 03.03.2026).

References

1. State Standard 22607–77. *Air conditioning systems for aircraft and helicopters. Terms and definitions*. Moscow: Standards Publishing House, 1977, 7 p.
2. Tkacheva V.R., Galka G.A. Overview of existing aircraft air conditioning systems. *Molodoy Ucheny*, 2016, no. 23 (127), pp. 91–95.
3. Kablov E.N. What the future is made of? New-generation materials, technologies for their creation and processing – the foundation of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
6. Kablov E.N. Key directions in the development of materials for aerospace technology. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
7. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. Modern polymer materials for manufacture of elements of the air conditioning system in flying apparatus. *Trudy VIAM*, 2017, no. 12 (60), pp. 63–73. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
8. Kablov E.N. Materials: The Foundation of Any Endeavor. *Delovaya slava Rossii*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
9. Ivanov M.S., Pavlukovich N.G., Donskih I.N., Morozova V.S. Influence of operational factors on the properties of fabricfilm material for lowpressure air ducts of the air conditioning system of aircraft. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), pp. 118–127. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-118-127.
10. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Barbotko S.L., Barannikov A.A. Study of flammability, smoke formation and toxicity in the process of combustion of polymer composite materials and three-layer honeycomb structures based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), pp. 73–85. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.
11. State Standard 19907–2015. *Electrical insulating fabrics made of twisted glass multifilament yarns*. Moscow: Standartinform, 2015, 12 p.
12. Dvornic P.R. Thermal properties of polysiloxanes in Silicon-Containing Polymers. *The Science and Technology of Their Synthesis and Applications*. Eds. R.G. Jones, W. Ando, J. Chojnowski. Springer, 2000, pp. 185–213.
13. Buch R.R. Rates of heat release and related fire parameters for silicones. *Fire Safety Journal*, 1991, vol. 17, pp. 1–12.
14. Hsieh F.Y. Shielding effects of silica-ash layer on the combustion of silicones and their possible applications on the fire retardancy of organic polymers. *Fire and Materials*, 1998, vol. 22, pp. 69–76.
15. Mansouri J., Burford R.P., Cheng Y.B., Hanu L. Formation of strong ceramified ash from silicone-based compositions. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, pp. 5741–5749.

16. David C.T. Silicone Rubber Flame Resistance. *Proceedings of the Hose Manufacturer Conference*. Hague, 2007, p. 14.
17. Dvornic P.R. High Temperature Stability of Polysiloxanes in Silicon Compounds: Silanes and Silicones. *Gelest Catalog*. Morrisville, 2004, pp. 419–432.
18. Grassie N., Macfarlane I.G. The thermal degradation of polysiloxanes. I. Poly(dimethylsiloxane). *European Polymer Journal*, 1978, vol. 14, pp. 875–884.
19. Jovanovic J.D., Govedarica M.N., Dvornic P.R., Popovic I.G. The thermogravimetric analysis of some polysiloxanes. *Polymer Degradation and Stability*, 1998, vol. 61, pp. 87–93.
20. Deshpande G., Rezac M.E. The effect of phenyl content on the degradation of poly(dimethyl diphenyl) siloxane copolymers. *Polymer Degradation and Stability*, 2001, vol. 74, pp. 363–370.
21. Grassie N., Francey K.F., Macfarlane I.G. The thermal degradation of polysiloxanes. Part 4: Poly(dimethyl/diphenyl siloxane). *Polymer Degradation and Stability*, 1980, vol. 2, pp. 67–83.
22. Hadayashida K., Tsuge S., Ohtani H. Flame retardant mechanism of polydimethylsiloxane material containing platinum compound studied by analytical pyrolysis technique and alkaline gas chromatography. *Polymer*, 2003, vol. 44, pp. 5611–5616.
23. *Silicone Coated Base Material and Air Bag Base Material*: pat. US 5529837A; appl. 27.02.95; publ. 25.06.96.
24. Zhou X., Qiu S.L., Mu X.W. et al. Polyphosphazenes-based flame retardants: A review. *Composites. Part B: Engineering*, 2020, vol. 202, p. 108397.
25. Cai W., Lin B., Qi L. et al. Bio-based and fireproof radiative cooling aerogel film: Achieving higher sustainability and safety. *Chemical Engineering Journal*, 2024, vol. 488, p. 150784.
26. Shen S., Xin Y., Niu Z. et al. Phosphazene derivative cross-linked liquid silicone rubber and its mechanical and thermal properties. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, vol. 203, p. 110086.
27. Cao C.F., Yu B., Huang J. et al. Biomimetic, Mechanically Strong Supramolecular Nanosystem Enabling Solvent Resistance, Reliable Fire Protection and Ultralong Fire Warning. *ACS Nano*, 2022, vol. 16, pp. 20865–20876.
28. Huang X., Tian Z., Zhang D. et al. The synergetic effect of antimony (Sb_2O_3) and melamine cyanurate (MCA) on the flame-retardant behavior of silicon rubber. *Polymer Bulletin*, 2020, vol. 78, pp. 185–202.
29. Zhou C., Wang J., Li J., Shi J. Thermal aging properties of flame retardant silicone rubber based on melamine cyanurate. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, vol. 138, p. 49919.
30. Wu T., Qiu J., Lai X. et al. Effect and mechanism of hepta-phenyl vinyl polyhedral oligomeric silsesquioxane on the flame retardancy of silicone rubber. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, vol. 159, pp. 163–173.
31. Wu Q., Gong L.-X., Li Y. et al. Efficient Flame Detection and Early Warning Sensors on Combustible Materials Using Hierarchical Graphene Oxide/Silicone Coatings. *ACS Nano*, 2018, vol. 12, pp. 416–424.
32. Rybiński P., Syrek B., Bradło D., Żukowski W. Effect of POSS Particles and Synergism Action of POSS and Poly-(Melamine Phosphate) on the Thermal Properties and Flame Retardance of Silicone Rubber Composites. *Materials*, 2018, vol. 11, p. 1298.
33. Zhang W., Camino G., Yang R. Polymer/polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) nanocomposites: An overview of fire retardance. *Progress in Polymer Science*, 2017, vol. 67, pp. 77–125.
34. Gao X., Liu H., Wei H. et al. Effect of incompletely condensed tri-silanol-phenyl-POSS on the thermal stability of silicone rubber. *Polymer Bulletin*, 2018, vol. 76, pp. 2835–2850.
35. Yaoke D., Yuan Z., Wang J. Synthesis of a phosphorus-containing trisilanol POSS and its application in RTV composites. *e-Polymers*, 2018, vol. 18, pp. 237–245.
36. Zhu C., Deng C., Cao J.-Y., Wang Y.-Z. An efficient flame retardant for silicone rubber: Preparation and application. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, vol. 121, pp. 42–50.
37. Konstantinova A., Yudaev P., Orlov A. et al. Aryloxyphosphazene-Modified and Graphite-Filled Epoxy Compositions with Reduced Flammability and Electrically Conductive Properties. *Journal of Composites Science*, 2023, vol. 7, p. 417.

38. Bornosuz N.V., Gorbunova I.Y., Kireev V.V. et al. Synthesis and Application of Arylaminophosphazene as a Flame Retardant and Catalyst for the Polymerization of Benzoxazines. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 263.
39. Orlov A., Konstantinova A., Korotkov R. et al. Epoxy Compositions with Reduced Flammability Based on DER-354 Resin and a Curing Agent Containing Aminophosphazenes Synthesized in Bulk Isophoronediamine. *Polymers*, 2022, vol. 14, p. 3592.
40. Yang J., Ma W., Hu D. et al. Facile preparation and flame retardancy mechanism of cyclophosphazene derivatives for highly flame-retardant silicone rubber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, vol. 138, p. 50297.
41. Nazir M.T., Khalid A., Kabir I. et al. Flame Retardancy and Excellent Electrical Insulation Performance of RTV Silicone Rubber. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 2854.
42. Chen X., Li M., Zhuo J. et al. Influence of Fe_2O_3 on smoke suppression and thermal degradation properties in intumescent flame-retardant silicone rubber. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 123, pp. 439–448.
43. *Aluminum hydroxide FRAMIAL*. Available at: <https://geokom.com/ru/framial/> (accessed: March 03, 2026).

Информация об авторах

Макрушин Константин Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ищенко Иван Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Платонов Максим Михайлович, генеральный директор, к.х.н., ООО «НИЦ «СПМ», info@nic-spm.ru

Бабин Анатолий Николаевич, директор по исследованиям и разработкам, ООО «НИЦ «СПМ», info@nic-spm.ru

Information about the authors

Konstantin V. Makrushin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan A. Ishchenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maksim M. Platonov, Director General, Candidate of Sciences (Chem.), SIC SPM LLC, info@nic-spm.ru

Anatoly N. Babin, Director of Research and Development, SIC SPM LLC, info@nic-spm.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.07.2026.
The article was submitted 18.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 20.07.2026.