

УДК 678.8

В.И. Постнов¹, Р.А. Сатдинов¹, К.В. Макрушин¹, М.С. Иванов¹

ВОПРОСЫ КОНСТРУКТИВНОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОТРАБОТКИ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-66-76

Обсуждены основные вопросы конструктивной и технологической отработки гибких трубопроводов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) систем кондиционирования воздуха (СКВ) современной авиационной техники. Проведен анализ существующих конструкций гибких трубопроводов СКВ из ПКМ. Показаны основные результаты исследований, образцы гибких трубопроводов из ПКМ и общая схема технологического процесса изготовления гибких трубопроводов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, гибкие трубопроводы, системы кондиционирования воздуха, эластичная оболочка, армирование спиралью жесткости, терморезактивное связующее.

V.I. Postnov¹, R.A. Satdinov¹, K.V. Makrushin¹, M.S. Ivanov¹

ISSUES OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF FLEXIBLE PIPELINES MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR AIR CONDITIONING SYSTEMS

The main issues of structural and technological development of flexible pipelines made of polymer composite materials (PCM) of air conditioning systems (ACS) of modern aviation equipment are discussed. The analysis of existing designs of flexible pipelines of ACS from PCM is carried out. The main results of research, samples of flexible pipelines from PCM and the General scheme of the technological process of manufacturing flexible pipelines are shown.

Keywords: polymer composite materials, flexible pipes, air conditioning systems, elastic sheath, spiral reinforcement, thermosetting binder.

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

Создание современных систем кондиционирования воздуха (СКВ) – важнейшая задача при проектировании кабин самолетов. Данная система является одной из основных систем поддержания безопасной жизнедеятельности членов экипажа и пассажиров, а также работоспособности оборудования в полете и представляет собой комплекс устройств для обеспечения в кабине (отсеке) самолета (вертолета) требуемых температурно-влажностного и воздушного режимов [1]. Системы кондиционирования воздуха воздушных судов предусмотрены для создания и поддержания в них установленных нормами допускаемых условий воздушной среды, искусственных климатических условий, оптимальных (или близких к ним) гигиенических параметров воздуха в кабинах летательных аппаратов [2].

С середины 1960-х гг. основные элементы СКВ изготавливали преимущественно из металлов, широко использовались алюминиевые сплавы. В настоящее время крупнейшие зарубежные производители авиационной техники при проектировании элементов

СКВ воздушных судов массово внедряют полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые получили применение в том числе и в конструкциях гибких трубопроводов СКВ. Композиционные материалы, без сомнения, можно отнести к категории наиболее востребованных продуктов современного промышленного производства. В первую очередь их используют в высокотехнологичных отраслях, например в авиационно-космической отрасли [3]. Повышение весовой эффективности конструкций и узлов разрабатываемой техники невозможно без применения новых материалов и технологий их переработки. Например, использование технологий изготовления деталей и узлов мотогондолы двигателя из ПКМ обеспечило снижение их массы не менее чем на 20% (по сравнению с деталями и узлами из алюминиевых сплавов) [4]. Во ФГУП «ВИАМ» для замены алюминиевых сплавов в элементах СКВ разработан и внедрен стеклопластик на основе стеклоткани с низкой поверхностной плотностью и пожаробезопасного быстроотверждаемого связующего марки ВСФ-16М [5]. Трубопроводы и корпуса из такого стеклопластика представляют собой жесткие и легкие конструкции сложной геометрической формы.

Гибкие трубопроводы низкого давления СКВ из ПКМ имеют ряд преимуществ перед жесткими конструкциями и обеспечивают:

- возможность монтажа с минимальными затратами и в различных местах отсеков летательного аппарата;
- более плотную компоновку трубопроводов и за счет этого увеличение внутреннего пространства кабин;
- снижение массы СКВ за счет применения материалов с низкой плотностью;
- исключение коррозии в элементах системы СКВ;
- безопасные деформации трубопровода при монтаже в широких пределах.

Материалы и методы

Обычно конструкция гибкого трубопровода СКВ представляет собой тонкую эластичную герметичную оболочку круглого сечения, армированную спиралью жесткости, с размещенными по краям эластичными манжетами для соединения с другими элементами системы (рис. 1).



Рис. 1. Гибкий трубопровод системы кондиционирования воздуха, армированный спиралью жесткости из полиамида

Как известно [6], к гибким трубопроводам СКВ предъявляются общие требования к конструкциям агрегатов современной авиационной техники, такие как пожаробезопасность, минимальная масса, высокая надежность, герметичность, стабильность свойств в диапазоне рабочих температур.

В результате анализа различных типов гибких трубопроводов СКВ установлен ряд специфических параметров, зависящих от конструкции конкретного гибкого трубопровода, оптимизация которых представляет собой важную задачу. К таким параметрам

относятся: сохранение постоянного сечения трубопровода при изгибе на угол 90 градусов и более, определенный вид складок при изгибе, выбор оптимального шага намотки спирали жесткости, обеспечение герметичности и гибкости стыка оболочки трубопровода, оформление оптимальной конструкции эластичных манжет.

Кроме того, пожаробезопасность, т. е. соответствие требованиям АП-25 или FAR-25, должна обеспечиваться выбором негорючих или самозатухающих материалов для компонентов оболочки, армирующей спирали жесткости, манжет, эластичного связующего для склейки оболочки со спиралью жесткости и манжетами.

Одним из основных требований конструкторов, как правило, является применение в составе конструкций изделий летательных аппаратов материалов, сочетающих малую плотность с высокими прочностными и теплофизическими свойствами при высоких рабочих температурах [7]. До недавнего времени большинство подобных материалов были импортными.

В настоящее время, в период непростой экономической ситуации, когда предпринимаются попытки изоляции нашей страны с помощью санкций и ограничений [8], в целях импортозамещения поставлена задача – все комплектующие для отечественных самолетов должны выпускаться из отечественных материалов [9]. Так, опробован ряд конструкций гибких трубопроводов СКВ, включающих отечественные материалы. Например, отработана, испытана и уже применяется в составе систем СКВ нового отечественного пассажирского самолета конструкция гибкого трубопровода с оболочкой на основе фторкаучука, армированного стеклотканью, и манжетами, армированными стеклотканью, в качестве матрицы для которых использовали кремнийорганический герметик со спиралью жесткости на основе тканевого жгута из стеклянных нитей, пропитанного отвержденным фенолформальдегидным связующим. Связующим для склеивания всех элементов гибкого трубопровода служит тот же герметик. Все перечисленные материалы, входящие в состав данного трубопровода, изготавливаются по отечественным ТУ и ГОСТ, являются негорючими или самозатухающими. Соответствие конструкции гибкого трубопровода требованиям АП-25 по пожаробезопасности подтверждено испытаниями по установленным методикам. В настоящее время спирали жесткости во многих конструкциях гибких трубопроводов выполняют из термопластов или металлической проволоки [6, 10, 11]. Применение в составе спиралей жесткости материалов типа полиамида и других термопластов для обеспечения требований пожаробезопасности требует добавления различных антипиренов в значительных количествах. Эту меру нельзя назвать рациональной, так как многие антипирены, особенно галогенсодержащие, неприемлемы для экологии в закрытом помещении.

Достижение минимальной массы гибкого трубопровода является приоритетом для любой авиационной конструкции. В решении данной задачи необходим компромисс между требованиями минимума массы, обеспечением герметичности трубопровода при рабочем давлении, сохранением постоянного сечения трубопровода при изгибе на любой угол и достижением минимального сопротивления потоку воздуха, т. е. отсутствием значительных складок гибкого трубопровода при деформациях.

Герметичность гибкого трубопровода зависит от конструкции тканепленочного материала оболочки, которая при минимальной массе должна быть эластичной и в то же время прочной, а также термостойкой в широком диапазоне температур – обычно от -60 до +80 °С (но возможен и более широкий диапазон) [12, 13]. Однако тканепленочный материал, как правило, изготавливается в виде полотна, и оформление герметичного и эластичного стыка оболочки представляет собой непростую задачу. В данном случае возможны два способа стыковки оболочки при изготовлении гибких трубопроводов – сварка и склейка. Сварка оболочки обеспечивает герметичность

и прочность соединения при условии создания постоянного равномерного давления и высокой постоянной температуры в точке сварки, что достигается при использовании специального автоматизированного оборудования. В условиях опытного и мелкосерийного производства способ склейки более предпочтительный и недорогой. Например, высокие и стабильные результаты с достижением заданной герметичности, соответствующей группе 2-12 по ОСТ1 00128–74, получены при склейке с применением кремнийорганических герметиков оболочки на основе фторсодержащих каучуков, армированных стеклотканью. Для повышения адгезии при склейке материал оболочки активируется путем соответствующей обработки.

При проектировании гибких трубопроводов их оболочку в упрощенном виде можно рассматривать как оболочку вращения простой формы. Рассчитать геометрические параметры оболочки вращения простой формы не составляет труда, поскольку использование конечно-разностных или классических интерполяционных формул не приводит к существенным неточностям при вычислении кривизны [14]. Однако при конструировании гибких трубопроводов к критериям соответствия расчетным параметрам прочности и минимальной массы следует добавить такие критерии, как сохранение постоянного сечения и определенного вида складок при изгибах гибкого трубопровода.

Требования сохранения постоянного сечения гибкого трубопровода и определенного вида складок при изгибе на любой угол необходимы для обеспечения минимального сопротивления движению потока воздуха, что важно для экономичности (уменьшения затрат на отбор сжатого воздуха) и снижения шума при работе СКВ в полете. Виды складок оболочки, которые появляются при изгибах гибкого трубопровода, показаны на рис. 2. Очевидно, что предпочтительным является появление складок снаружи изгиба трубопровода, так как при этом не возникает значительного сопротивления движению потока воздуха. Складки, направленные внутрь при изгибе трубопровода, наоборот, повышают сопротивление движению потока воздуха, так как уменьшается площадь сечения трубопровода.

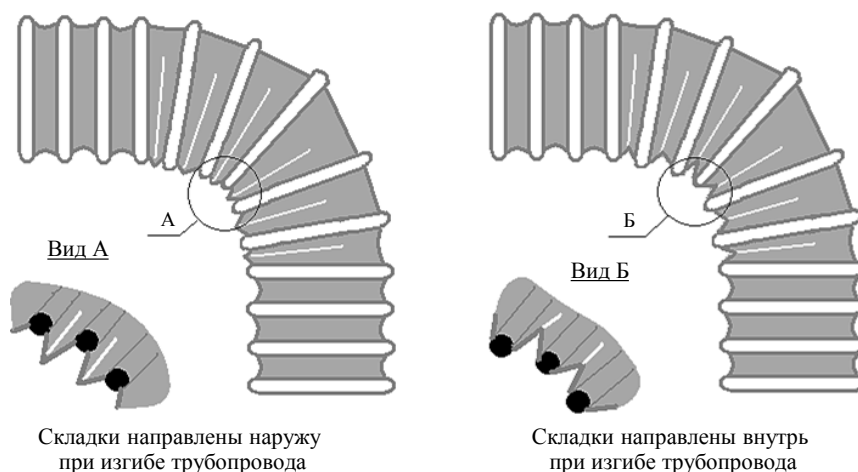


Рис. 2. Виды складок при изгибе гибкого трубопровода системы кондиционирования воздуха

Причиной нарушения постоянного сечения трубопровода и появления складок, направленных внутрь при изгибе, является потеря устойчивости спирали жесткости. Увеличение шага намотки с целью снижения массы трубопровода более некоторого предела при изгибе трубопровода может привести к деформации сечения и его овальности, что вызывает утяжку оболочки и появление значительных складок внутрь при изгибе. Примерный график зависимости массы 1 дм^2 площади гибкой части трубопровода от шага намотки спирали жесткости показан на рис. 3.

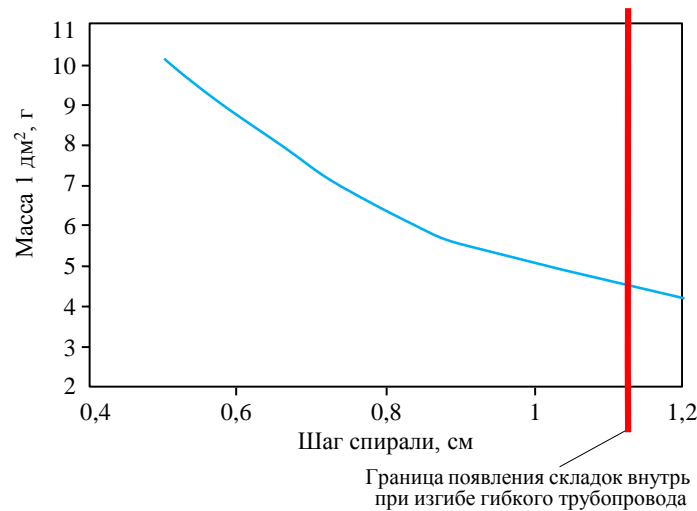


Рис. 3. Зависимость массы 1 дм² гибкой части трубопровода от шага намотки спирали жесткости

На графике также обозначена граница предельного увеличения шага намотки спирали жесткости, после которой происходит потеря устойчивости спирали и появляются складки внутрь при изгибе трубопровода. Пример приведен при расчете и анализе данных гибкого трубопровода с оболочкой из фторкаучука, армированной стеклотканью, и со спиралью жесткости из полиамида диаметром 1,5 мм. Видно, что масса гибкого трубопровода имеет значительную зависимость от шага намотки спирали жесткости: чем меньше шаг, тем больше длина развертки спирали жесткости. Длину развертки спирали жесткости (B) рассчитывают по формуле

$$B = k \frac{L}{a} \sqrt{(\pi D)^2 + a^2},$$

где D – диаметр оболочки трубопровода; a – расстояние между соседними витками при намотке (шаг); L – длина оболочки трубопровода без манжет; k – коэффициент учета потерь на припуск при намотке (постоянная величина для конкретного типа оборудования для намотки); $\pi=3,14159$.

Для анализа различных конструкций гибких трубопроводов рассмотрим следующие примеры. Известна конструкция гибкого трубопровода, содержащего оболочку из эластичного материала и установленный в ней по всей длине усиливающий элемент в виде открытой винтовой металлической спирали, которая выполнена из материала, обладающего «эффектом памяти», – из никелида титана [15]. В качестве оболочки используется эластичный материал типа полихлорвинила. Недостатками данной конструкции являются:

- сложность технологического процесса изготовления, включающего термообработку намотанной спирали (до температуры 400–500 °С), ее охлаждение, перенавивку и повторный нагрев до температуры >70 °С;
- использование эластичной оболочки из термопластичного материала типа полихлорвинила, не обладающего свойствами пожарной безопасности и имеющего пониженные механические свойства из-за отсутствия армирования тканью;
- более высокие весовые характеристики металлической спирали по сравнению со спиралью из ПКМ.

Известен также способ изготовления эластичных трубопроводов, армированных спиралью жесткости [16]. Он включает навивку на дорн спирали жесткости и распределение поперх нее эластичной трубчатой оболочки. Недостатком такой конструкции

гибкого трубопровода является то, что внутреннее давление среды, заполняющей трубопровод при его работе, воспринимается только оболочкой, размещенной поверх спирали жесткости. Таким образом, спираль жесткости не участвует в обеспечении прочности трубопровода, а служит только для сохранения геометрических размеров сечения. Кроме того, спираль жесткости, размещенная внутри оболочки, повышает сопротивление при движении воздушных потоков.

В настоящее время широко применяется конструкция гибких трубопроводов фирмы Senior Aerospace BWT, которая является основным поставщиком гибких трубопроводов СКВ для зарубежных авиастроительных компаний. Трубопроводы этой фирмы представляют собой эластичные оболочки на основе нейлона или силикона, армированные стекловолокном и усиленные спиралями жесткости из монолитных термопластичных ПКМ или металлов.

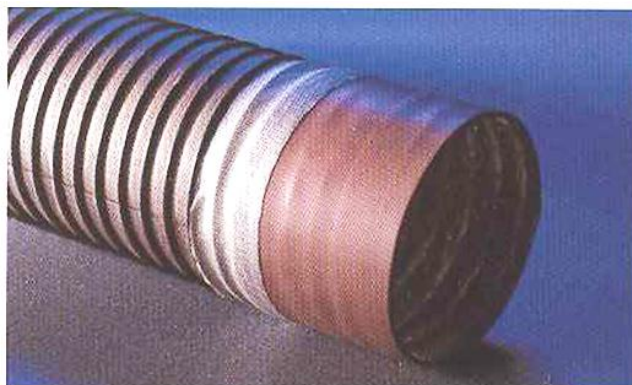


Рис. 4. Гибкий трубопровод фирмы Senior Aerospace BWT

Внешний вид типичного гибкого трубопровода фирмы Senior Aerospace BWT показан на рис. 4. Данная конструкция может считаться близкой к оптимальной для условий эксплуатации при температурах до 200 °С и внутренних давлениях до 17,2 кПа. Указанные характеристики заявлены в технических условиях фирмы, размещенных в открытых источниках информации, но являются недостаточными для возможной замены металлических трубопроводов участков СКВ, систем антиобледенения и других, отходящих от зон отбора горячего сжатого воздуха от компрессоров авиадвигателей и подобных источников, на трубопроводы из ПКМ. Это обстоятельство можно считать недостатком данной конструкции с учетом тенденций развития авиакосмической и другой техники, направленных на повышение экономичности и замену металлических конструкций на конструкции из ПКМ. Кроме того, спираль жесткости из термопластичного материала может расплавиться или потерять упругие свойства в случае возможного увеличения температуры (более той, которая указана в технических условиях) из-за каких-либо отказов или повреждений оборудования, а металлическая спираль может необратимо деформироваться из-за малой площади поперечного сечения проволоки в случае возможных значительных внешних усилий (например, случайного сильного нажатия).

Результаты и обсуждение

Для исключения рассмотренных недостатков во ФГУП «ВИАМ» разработаны и испытаны конструкция, а также способ изготовления гибкого трубопровода из ПКМ с эластичной оболочкой, армированной тканью с углом расположения нитей основы и утка к продольной оси трубопровода ± 45 градусов, что обеспечивает оптимальную гибкость и минимальное сопротивление потоку воздуха при его деформациях. Поверх

оболочки на эластичном клее приклеена спираль жесткости из шнура, состоящего из нитей и пропитанного низкоконцентрированным раствором термореактивного связующего, отвержденного после приклейки. Возможно применение фенолформальдегидного связующего, которое в отвержденном виде имеет ряд преимуществ, таких как пожарная безопасность, высокая термическая и химическая стойкость, а также безопасность для экологии [17].

Концентрация раствора связующего подобрана максимально низкой, что исключает хрупкое разрушение шнура при его изгибе (если бы концентрация раствора соответствовала известным пропорциям для применяемого типа связующего, то произошло бы разрушение). Низкая концентрация связующего после его отверждения придает упругие свойства спирали жесткости и обеспечивает сохранение геометрической формы сечения трубопровода при его изгибе, а также восприятие нагрузки от внутреннего и внешнего давления. Следствием этого принципа является следующее: до намотки и приклейки спираль жесткости имеет вид мягкого шнура, а упругие свойства приобретает только после заключительной термообработки. Тем самым обеспечивается легкий и быстрый способ изготовления гибкого трубопровода с помощью намотки на разборную цилиндрическую оправку из клинообразных элементов и приклейки с использованием обычного станочного оборудования типа намоточного или токарного станка с простыми приспособлениями (катушкой, резервуаром и фильерами) либо аналогичных устройств, а также с возможностью автоматизации процесса (при необходимости изготовления крупной серии).

По открытым сторонам трубопровода на эластичном клее устанавливают манжеты из эластичного материала, армированного тканью с углом расположения нитей основы и утка к продольной оси трубопровода ± 45 градусов, что обеспечивает легкое герметичное соединение со стандартными патрубками других элементов СКВ. Ткань, которой армированы оболочка и манжеты, снаружи покрыта слоем эластичного материала на основе кремнийорганического герметика для исключения местных разрушений ткани при многократных изгибах трубопровода во время эксплуатации. Кроме того, материалы оболочки, шнура, эластичного клея, раствора связующего и манжет, а также шаг намотки спирали жесткости подобраны для обеспечения предъявляемых требований по пожарной безопасности, экологии, герметичности, для работы при максимальной границе диапазона рабочей температуры >200 °С и максимальной границе диапазона рабочего внутреннего давления не менее 0,05 МПа с целью возможной замены металлических трубопроводов участков СКВ, систем антиобледенения и других, отходящих от зон отбора горячего сжатого воздуха от компрессоров авиадвигателей и подобных источников на трубопроводы из ПКМ. В случаях возможного повреждения или отказа оборудования, приводящих к повышению рабочей температуры (более той, которая указана в технических условиях), спираль жесткости данной конструкции трубопровода на основе негорючих материалов типа шнура из стеклянных или арамидных нитей и высокотемпературного связующего (фенолформальдегидного или полиимидного) не расплавится и не разрушится в силу химических особенностей используемого термореактивного связующего (например, рабочая температура полиимидов – до 400 °С) [18]. Кроме того, в случае возможных значительных внешних усилий, например случайного сильного механического воздействия, спираль жесткости данной конструкции трубопровода не может необратимо деформироваться и потерять упругие свойства, так как ее площадь поперечного сечения значительно больше площади поперечного сечения металлической проволоки той же массы, а шнур, пропитанный термореактивным связующим, после его отверждения представляет собой упругую объемную систему [19].

Внешний вид и схема конструкции гибкого трубопровода из ПКМ показаны на рис. 5. Поверхностная плотность гибкой части этого трубопровода – не более 8 г/дм^2 , термостойкость – не менее $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Схема изготовления конструкции гибкого трубопровода из ПКМ показана на рис. 6.

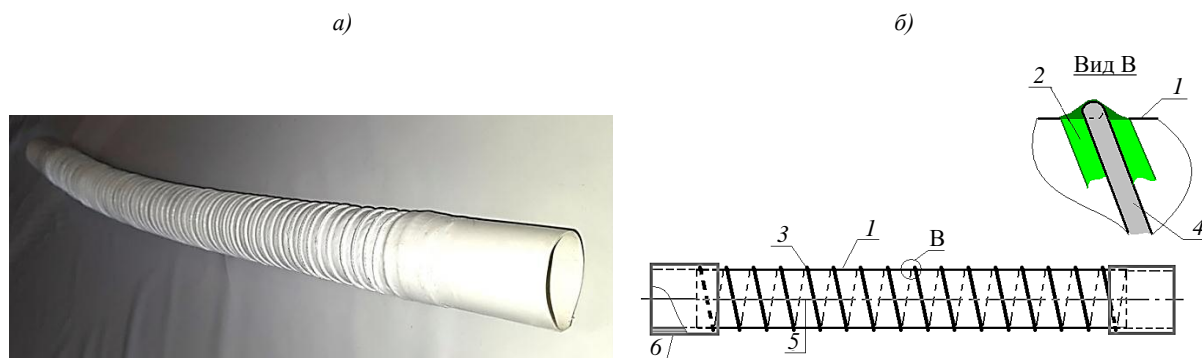


Рис. 5. Внешний вид (а) и схема (б) гибкого трубопровода системы кондиционирования воздуха, армированного спиралью жесткости в виде шнура с арамидными нитями и пропитанного отвержденным термореактивным связующим: 1 – оболочка; 2 – эластичный клей; 3 – спираль жесткости; 4 – шнур из нитей, пропитанный отвержденным термореактивным связующим; 5 – продольная ось трубопровода; 6 – манжета

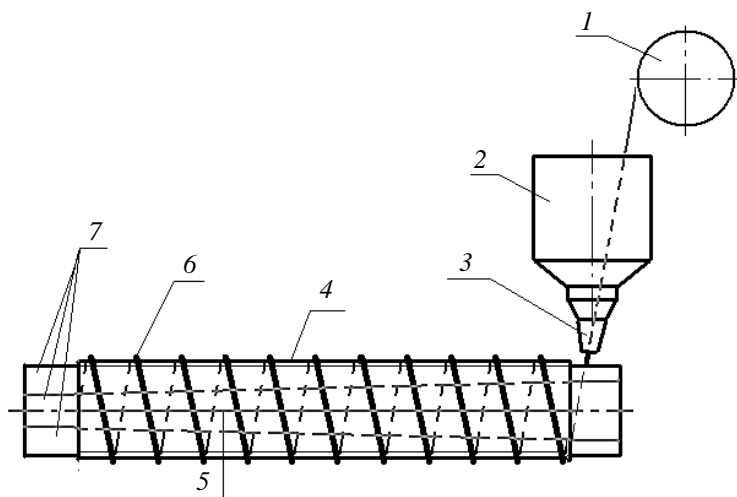


Рис. 6. Схема изготовления гибкого трубопровода СКВ со спиралью жесткости в виде шнура из нитей, пропитанного отвержденным термореактивным связующим: 1 – катушка со шнуром, пропитанным раствором высушенного термореактивного связующего; 2 – резервуар с жидким эластичным клеем; 3 – фильера, обеспечивающая необходимый нанос клея; 4 – оболочка; 5 – стык оболочки; 6 – шнур, приклеенный эластичным клеем; 7 – клинообразные элементы оправки

В качестве эластичного клея возможно использование раствора кремнийорганического (или другого герметика) либо фторкаучука, вулканизируемого при температуре окружающей среды. Отверждение термореактивного связующего, которым пропитан шнур, должно происходить при повышенной температуре после вулканизации (сушки) эластичного клея. Перед намоткой шнура на оправку по линии, параллельной оси трубопровода, склеивается или сваривается оболочка из тканепленочного материала. Следует применять разборные оправки, сложные в изготовлении, но использование которых позволяет упростить процесс производства, а главное – демонтаж заготовок [20].

Данный способ изготовления гибких трубопроводов имеет особенность: длина получаемого трубопровода не может превышать длину применяемой разборной оправки. В свою очередь длина оправки ограничена возможностями оборудования для намотки. С целью получения гибких трубопроводов любой необходимой длины отработана технология «сращивания» отдельных фрагментов трубопроводов на разборных оправках путем соединения их с помощью эластичных герметичных муфт из кремнийорганического герметика, вулканизируемого при температуре окружающей среды без доступа воздуха, с армированием стеклотканью. Внешний вид таких гибких трубопроводов показан на рис. 7.



Рис. 7. Гибкие трубопроводы СКВ с длиной, превышающей размеры технологической оснастки

К манжетам для соединения гибких трубопроводов с другими элементами СКВ предъявляется ряд требований. Манжеты должны быть не только пожаробезопасными и термостойкими, но также эластичными и герметичными, легко монтироваться и сниматься с патрубков других агрегатов СКВ. Разработанная и испытанная конструкция манжеты представляет собой тонкостенную сплошную эластичную оболочку, выполненную из кремнийорганического герметика, способного вулканизироваться при комнатной температуре без доступа воздуха, и армированную стеклотканью с углом укладки нитей ± 45 градусов. После изготовления манжеты должен оставаться припуск сухой стеклоткани для склейки с гибкой частью трубопровода. Внешний вид манжеты и оснастка для ее изготовления показаны на рис. 8.



Рис. 8. Манжета гибкого трубопровода и оснастка для ее изготовления

Очевидно, что изготовленные гибкие трубопроводы СКВ должны быть испытаны на соответствие техническим условиям, прежде всего на герметичность. Для контроля герметичности гибких трубопроводов манометрическим методом разработан, изготовлен и применяется специальный мобильный стенд (рис. 9).

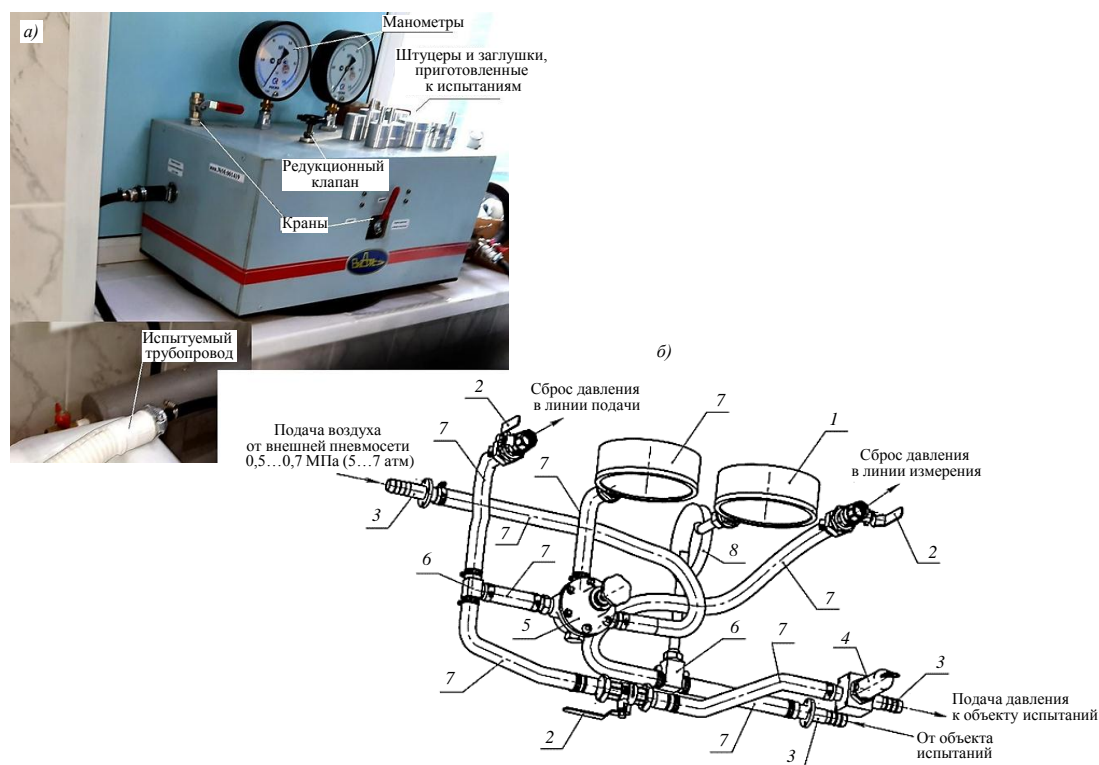


Рис. 9. Внешний вид (а) и схема (б) пневматического стенда для испытаний гибких трубопроводов на герметичность: 1 – манометры; 2 – краны шаровые; 3 – штуцеры; 4 – пневмоклапан предохранительный; 5 – пневмоклапан редукционный; 6 – тройники; 7 – соединительные шланги; 8 – трубка петлевая

Заключения

Проведенная во ФГУП «ВИАМ» конструктивная и технологическая обработка гибких трубопроводов из ПКМ систем кондиционирования воздуха позволила освоить серийные поставки таких трубопроводов из ПКМ для современной авиационной техники, отвечающих необходимым требованиям и изготовленных из отечественных материалов. Основные характеристики: термостойкость – не менее 300 °С, соответствие группе герметичности 2-12 по ОСТ1 00128–74 при избыточном внутреннем давлении 60 кПа, поверхностная плотность гибкой части – не более 14 г/дм², пожаробезопасность – в соответствии с АП-25.

Библиографический список

- ГОСТ 22607–77. Системы кондиционирования воздуха самолетов и вертолетов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1977. 7 с.
- Ткачева В.Р., Галка Г.А. Обзор существующих систем кондиционирования воздушных судов // Молодой ученый. 2016. №23 (127). С. 91–95.
- Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее. Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
- Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.

5. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Воздуховоды низкого давления из ПКМ в летательных аппаратах // Труды ВИАМ: электрон. научн.-техн. журн. 2016. №8 (44) Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-8-8.
6. 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: электрон. научн.-техн. журн. 2017. №12 (60). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
7. Гращенков 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. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.
9. Каблов Е.Н. Мы не должны собирать самолеты из иностранных комплектующих // Интеллект и технологии. 2014. №3 (9). С. 28–35.
10. Иванов М.С., Постнов В.И., Сапего Е.О., Сапего Ю.А. Термопластичная негорючая стренга для армирования гибкого трубопровода СКВ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. №12. С. 38–44.
11. Иванов М.С., Вешкин Е.А. Термопластичные материалы в конструкции гибкого трубопровода системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов // Термопластичные материалы и функциональные покрытия: материалы Всерос. научн.-техн. конф. (г. Москва, 23 апреля 2019 г.). М.: ВИАМ, 2019. С. 68–78.
12. Иванов М.С., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Донских И.Н. Новый отечественный тканепленочный материал для гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха летательных аппаратов // Труды ВИАМ: электрон. научн.-техн. журн. 2019. №4 (76). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-57-66.
13. Тканепленочный материал и изделие на его основе: пат. 2733779 Рос. Федерация. №2019136152; заявл. 11.11.19; опубл. 06.10.20.
14. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. М.: Машиностроение, 1988. 91 с.
15. Гибкий шланг: пат. 2015916 Рос. Федерация. №5025406/05; заявл. 04.02.92; опубл. 15.07.94.
16. Способ изготовления эластичных трубчатых изделий, армированных спиралью жесткости: пат. 2460645 Рос. Федерация. №2010140245/05; заявл. 04.10.10; опубл. 10.09.12.
17. Орлова О.В., Фомичева Т.Н., Окунчиков А.З., Курский Г.Р. Технология лаков и красок. М.: Химия, 1980. 79 с.
18. Сорокин М.Ф., Шодэ Л.Г., Кочнева З.А. Химия и технология пленкообразующих веществ. М.: Химия, 1981. 160 с.
19. Гибкий трубопровод из полимерного композиционного материала: пат. 2733797 Рос. Федерация. №2019136153; заявл. 11.11.19, опубл. 06.10.20.
20. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 140 с.