

Криогенный трубопровод с коротковолокнистой базальтовой теплоизоляцией

© М.А. Комков, Ю.В. Баданина, Д.А. Потапов, А.С. Новикова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Показана актуальность создания трубопроводов для подачи криогенных компонентов топлива к двигательным установкам летательных аппаратов с теплоизоляцией из базальтовых супертонких волокон и минеральной связки из Al_2O_3 . Рассмотрено конструктивно-технологическое решение криогенного топливопровода, состоящего из тонкостенного трубопровода, выполненного из комбинированных материалов на основе ультратонкого стального лайнера и намотанного углепластика. Проведена оптимизация массы законцовки фланца трубопровода совместно с комбинированной оболочкой трубопровода. Определены толщина и масса базальтовой теплоизоляции трубопровода на основе инженерной методики расчета эффективного коэффициента теплопроводности высокопористого волокнистого материала покрытия. Показано, что трубопровод с базальтовой теплоизоляцией имеет существенно меньшую массу, чем криогенный топливопровод с экранно-вакуумной теплоизоляцией, применяемый в самолете Ту-155.

Ключевые слова: теплоизолированный трубопровод, комбинированная оболочка, криогенная температура, высокопористая базальтовая теплоизоляция

Введение. В настоящее время исследование применения криогенных топлив в изделиях ракетно-космической техники (РКТ), авиации и наземном транспорте — актуальная задача. Создание современных летательных аппаратов (ЛА) невозможно без транспортировки криогенных топлив к двигательным установкам ЛА по теплоизолированным трубопроводам. Экологически чистые, энергоемкие криогенные топлива [1–4] на основе жидкого водорода, сжиженного природного газа (СПГ) или метана и кислорода повышают технико-экономические показатели двигательных установок ЛА. Если учесть, что СПГ экономичнее керосина по энерговыделению на 15 %, а также значительную разницу в стоимости этих двух видов топлива, то экономический эффект может оказаться весьма существенным — до 50 %.

Однако как в ракетостроении, так и в авиации одним из важнейших шагов к переходу на криогенное топливо является создание надежных, легких конструкций трубопроводов для транспортировки жидкого водорода к двигательным установкам ЛА. На самолете Ту-155, работающем на водородном топливе [1, 2], был применен топливопровод (термокейс), состоящий из двух разнесенных стальных (12Х18Н10Т) труб (рис. 1). Для защиты внутренней трубы от внешнего теплопритока при протекании жидкого водорода межтрубная полость вакуумировалась и заполнялась экранно-вакуумной теплоизоля-

цией. Такая конструкция обеспечивает необходимые условия работы топливопровода, но обладает большой погонной массой. Поскольку полетное время составляет не менее 3 ч, на борту самолета необходимо иметь систему непрерывного вакуумирования полостей топливопроводов и сопутствующих агрегатов. Усредненная погонная масса таких топливопроводов с проходными диаметрами $d_y = 50 \dots 100$ мм составляет не менее $5 \dots 7$ кг/м.

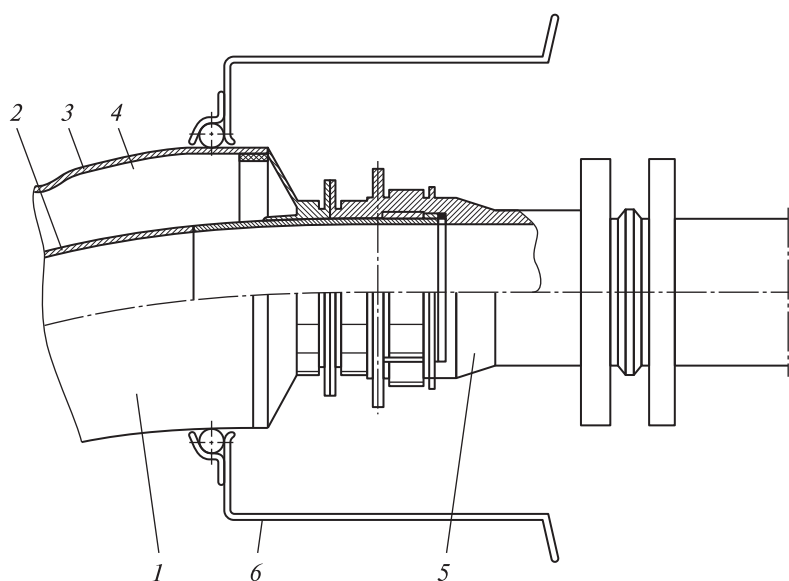


Рис. 1. Узел соединения криогенного топливопровода с двигателем самолета ТУ-155:

1 — криогенный топливопровод; 2 — внутренний трубопровод (12X18Н10Т); 3 — внешний трубопровод (12X18Н10Т); 4 — вакуум (экранно-вакуумная теплоизоляция); 5 — фланец двигателя; 6 — вакуумированный контейнер водородных агрегатов двигателя

Технологическое проектирование. Для снижения погонной массы топливопровода ранее в работе [5] авторами был предложен внутренний трубопровод (условный диаметр $d_y = 70$ мм), который выполнен из комбинированных материалов (12X18Н10Т+углепластик), при этом стальной лейнер имеет толщину 0,3 мм и для восприятия рабочих и разрушающих давлений ($p_{раз} = 10$ МПа) усилен композиционным материалом, намотанным под углом к оси изделия. Показано, что при углах намотки примерно $67,5^\circ$ осевые деформации лейнера и намотанного углепластика при циклическом захлаживании и отогреве трубопровода от нормальной температуры до температуры жидкого водорода будут иметь одинаковый уровень осевых деформаций, что устраняет потерю осевой устойчивости тонкостенной стальной обо-

лочки с образованием радиальных складок в области фланцевых законцовок. Погонная масса комбинированной оболочки трубопровода $d_y = 70$ мм без массы двух законцовок $M_{об}^{кмб} = 0,833$ кг/м.

Цель данной работы — снижение массы конструкции топливопровода за счет применения коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции, обеспечивающей подачу криогенных топлив к двигательным установкам ЛА вплоть до температуры жидкого водорода. В работе рассмотрено конструктивно-технологическое решение (КТР) топливопровода, оптимизация параметров фланце-петлевого соединения лейнера трубопровода с намотанной углепластиковой оболочкой и теплозащитного покрытия на основе коротких базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и минеральной связки из Al_2O_3 , работоспособного при температурах от -260 до 750 °С. Основными достоинствами базальтовой теплоизоляции [6, 7] являются ее экологическая чистота, низкая плотность ($140...156$ кг/м³), упругость, виброустойчивость, негорючесть.

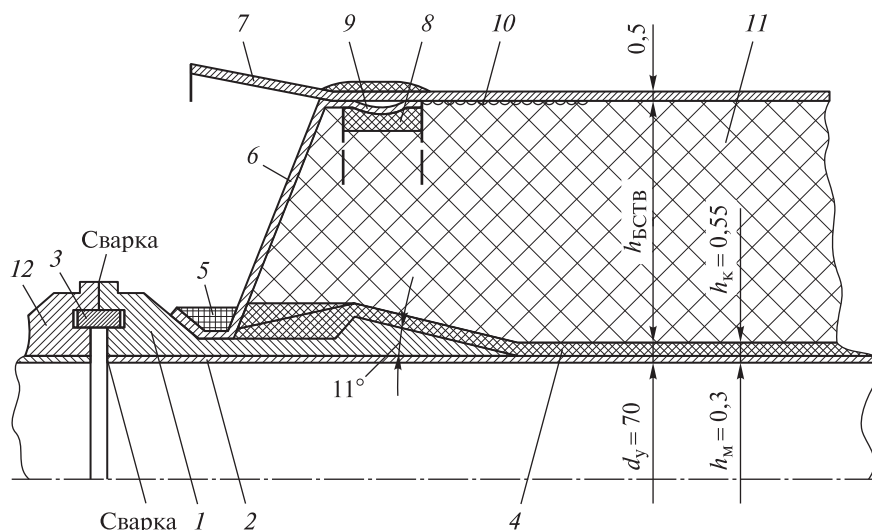


Рис. 2. Конструкция стыковочного узла криогенного трубопровода с коротковолокнистой базальтовой теплоизоляцией:

1 — фланец из стали 12X18H10T; 2 — лейнер; 3 — центрирующее кольцо; 4 — углепластиковая оболочка; 5 — поперечная обмотка стальной проволокой; 6 — крышка из пленки ПМФ-352; 7 — изолирующая оболочка из пленки ПМФ-352; 8 — опорное кольцо из углепластика; 9 — радиальная обмотка арамидной нитью; 10 — клеевой слой; 11 — базальтовая теплоизоляция в виде цилиндрических скорлуп; 12 — ответный фланец

На рис. 2 представлено КТР вне бакового криогенного топливопровода, включающего в себя внутреннюю силовую оболочку (трубопровод [5]) из комбинированных материалов, волокнистую базальтовую теплоизоляцию и внешнюю защитно-герметизирующую оболочку из полиимидно-фторопластовой пленки. Базальтовая теплоизоляция,

изготовленная методом жидкостной фильтрации коротких волокон в перфорированную пресс-форму [8], может иметь сложную пространственную и тонкостенную геометрию. При этом внешняя оболочка из намотанной полиимидной пленки ПМФ-352 и торцевые полиимидные крышки, работоспособные при температуре $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивают герметизацию базальтового теплоизоляционного покрытия от проникновения газовой среды из окружающего пространства.

Обсуждение результатов. Оптимизация массы фланцевого соединения криогенного трубопровода, выполненного из комбинированных материалов, проведена путем решения геометрических зависимостей, полученных на основе анализа фланце-петлевого соединения (рис. 3):

$$t_{\text{л}} \cong \frac{h_{\text{б}}}{\cos \beta_{\text{ц}}}; l_{\text{к}} = \frac{h_{\text{ц}} + h_{\text{б}}}{\text{tg} \gamma_{\text{к}}}; h_{\text{ц}} = R_{\text{ц}} - R = \frac{p_{\text{раз}} R_{\text{ц}}}{\sigma_{\text{т}}}; \alpha_{\text{охв}} \geq \ln \left(\frac{0,75 R_{\text{ц}}}{h_{\text{б}}} \right), \quad (1)$$

где $\beta_{\text{ц}} = 67,5^{\circ}$ — угол намотки на цилиндрическом участке; $R = 70,6\text{ мм}$ — наружный радиус лайнера; $p_{\text{раз}}$ — разрушающее давление; $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести металла; $\alpha_{\text{охв}}$ — угол охвата лентой бурта фланца, определенный по эмпирической зависимости [9], обеспечивает полное восприятие углепластиковой оболочкой осевой и окружной нагрузки от внутреннего давления в трубопроводе.

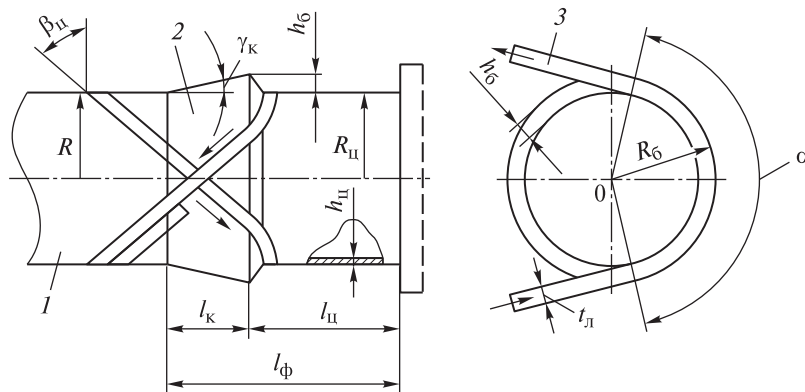


Рис. 3. Схема образования петлевого соединения углепластика с законцовкой фланца:

1 — трубопровод; 2 — фланец; 3 — лента из углеродных нитей

Согласно схеме на рис. 3, разворот наматываемой ленты шириной $t_{\text{л}}$ осуществляется на расширяющемся конусе фланца длиной $l_{\text{к}}$, формирование петли с углом охвата $\alpha_{\text{охв}}$ за выступом-буртом высотой $h_{\text{б}} = R_{\text{б}} - R_{\text{ц}}$ — на цилиндрической горловине фланца с радиусом $R_{\text{ц}}$ и длиной $l_{\text{ц}}$. Композитный слой при осевом растяжении оболочки

удерживается хвостовиком фланца путем образования захлестывающей петли на уступе законцовки трубопровода. Такое соединение обеспечивает надежную работоспособность по условиям прочности и минимальному приращению массы трубопровода. При этом длина разворота (реверс) ленты $l_{\text{рев}}$, наматываемой по линии равного геодезического отклонения (ЛРО) на цилиндрическом участке фланца от угла намотки $\beta_{\text{ц}}$ до угла $\beta = \pi/2$, и полный угол реверсивного разворота ленты в прямом и обратном направлениях $\varphi_{\text{рев}}$, определяемые по формулам работы [9], должны быть $l_{\text{рев}} \leq l_{\text{ц}}$ и $\varphi_{\text{рев}} \leq \alpha_{\text{охв}}$ соответственно:

$$l_{\text{рев}} = \frac{R_{\text{ц}}}{f_{\text{тр}}} \frac{(1 - \sin\beta_{\text{ц}})}{\sin\beta_{\text{ц}}} \leq l_{\text{ц}}; \quad \varphi_{\text{рев}} = \frac{2}{f_{\text{тр}}} \ln \frac{\sin\beta_{\text{ц}}}{(1 - \cos\beta_{\text{ц}})} \leq \alpha_{\text{охв}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{тр}} \approx 0,2$ — допустимый угол трения между углепластиком и сталью. Масса хвостовика фланца равна массе металла и композитного материала и зависит от угла конусности хвостовика $\gamma_{\text{к}} = 9...11^\circ$, относительной высоты бурта $\bar{h}_{\text{б}}$ и угла охвата фланца $\alpha_{\text{охв}}$.

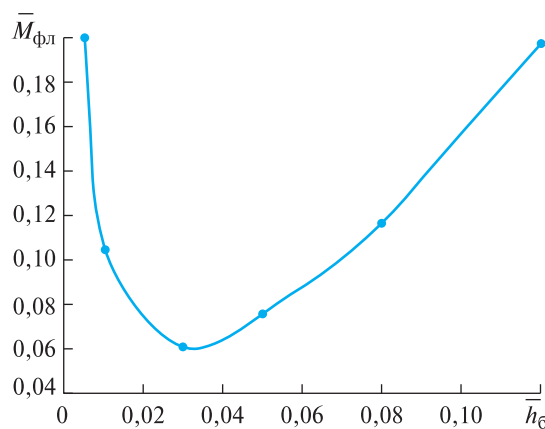


Рис. 4. Зависимость суммарной массы хвостовика фланца с намотанным углепластиком от относительной высоты бурта для трубопровода $d_y = 70$ мм

Результаты проектных расчетов по формулам (1) и (2) для диаметра трубопровода 70 мм длиной 1 м показывают, что минимальное значение относительной массы хвостовика фланца $\bar{M}_{\text{фл}} = M_{\text{фл}} / M_{\text{об}}^{\text{кмб}}$ из комбинированных материалов достигается при значениях $\bar{h}_{\text{б}} =$

$= \frac{h_{\text{б}}}{R_{\text{ц}}} = 0,03...0,05$ и составляет $\overline{M_{\text{фл}}} = 0,06...0,08$ (рис. 4). При

намотке нитей под углом $\beta_{\text{ц}} = 67,5^\circ$ к оси трубопровода угол реверса за буртом фланца $\varphi_{\text{рев}} = 4,03$ рад, но при намотке углепластика на лейнер принимается кратным 2π , т. е. равным 360° . Таким образом, масса комбинированного трубопровода длиной 1 м с двумя фланцами при $\overline{M_{\text{фл}}} = 0,08$ будет составлять $M_{\text{тр}} = M_{\text{об}}^{\text{кмб}} (1 + 2\overline{M_{\text{фл}}}) = 0,966$ кг.

Отметим, что экспериментальные исследования соединения типа «вмотанный фланец», проведенные на модельных и натуральных трубопроводах [5], показали его работоспособность вплоть до предельных нагрузок без повреждений в зоне концевой заделки.

Определение толщины теплоизоляционного покрытия комбинированного трубопровода из БСТВ ($d_a = 0,5...3,5$ мкм) выполнено на основе инженерной методики расчета эффективного коэффициента теплопроводности [6, 8], учитывающего кондуктивный и радиационный перенос теплоты в высокопористой коротковолокнистой теплоизоляции, в виде суммы трех составляющих:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}} + \lambda_{\text{рад}} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{рад}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{б.в}}$, $\lambda_{\text{возд}}$, $\lambda_{\text{рад}}$, $\lambda_{\text{конд}}$ — соответственно коэффициенты теплопроводности каркаса из коротких ($l_a = 1,0...1,5$ мм) базальтовых волокон, сухого и спокойного воздуха, радиационной и кондуктивной теплопроводности. Коэффициент лучистой теплопроводности для базальтовых волокнистых материалов $\lambda_{\text{рад}}$ определяется по следующим формулам [8]:

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{\sigma_0 T_m^3}{K_{\text{осл}}} \frac{\pi d_{\text{в}}}{(1-m)}; K_{\text{осл}} = 70 m d_{\text{в}} T_m + 5 \cdot \frac{10^3 (1-m)}{T_m}; T_m = \sqrt[3]{\frac{T_1^3 + T_2^3}{2}}, \quad (4)$$

где σ_0 — константа Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м \cdot К); T_m — средняя температура изоляции, $T_m = 232$ К; $m = 0,94$ — пористость теплоизоляции; $d_{\text{в}} = 1,92 \cdot 10^{-6}$ м — средний диаметр БСТВ, полученный после обработки электронных фотографий; $K_{\text{осл}} = 1,319$ — коэффициент ослабления (константа); T_1 — температура теплоизоляционного покрытия топливопровода, $T_1 = 293$ К; T_2 — температура жидкого водорода, $T_2 = 20$ К. Подстановка числовых значений в формулы (4) дает $\lambda_{\text{рад}} = 0,00544 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м \cdot К).

Следовательно, радиационная составляющая (4) оказывает существенное влияние лишь при очень малой плотности материала теплоизоляции и его высокой пористости $m \geq 0,94$. При значениях пористости волокнистой структуры $m \leq 0,94$ радиационная составляющая намного меньше кондуктивной теплопроводности и в равенстве (3) ее можно не учитывать. Без учета тепловых потерь на лучистый перенос теплоты и при спокойном состоянии воздуха в порах теплоизоляционного материала коэффициент кондуктивной теплопроводности можно записать на основе правила суммирования:

$$\lambda(m, T) = \lambda_{\text{конд}} = m\lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}} + (1-m)\lambda_{\text{б.в}}^{\text{cp}}, \quad (5)$$

где m — пористость теплоизоляции, $m = 1 - \rho_{\text{тим}} / \rho_{\text{б.в}}$; $\rho_{\text{тим}}$ — плотность теплоизоляции; $\rho_{\text{б.в}}$ — плотность материала базальтовых волокон, $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$.

Анализ теплоизоляционных материалов на основе коротких БСТВ показал [6, 10], что коэффициент теплопроводности равномерно распределенных волокон и сухого воздуха, полученный расчетным путем на основе правила суммирования (5), на 75 % меньше коэффициента теплопроводности прошивных матов из базальтовых супертонких штапельных волокон (рис. 5), изготовленных по ТУ 5769-002-0164840370–2013 (MINOL). Средние значения коэффициентов сухого воздуха $\lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}} = 0,0164 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и материала базальтовых волокон $\lambda_{\text{б.в}}^{\text{cp}} = 0,0241 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для интервала температур $-200 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$ определены на основании графических зависимостей (см. рис. 5), так как теплопроводность БСТВ при температуре $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ [11] равна $0,0127 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Тогда в соответствии с выражением (5) и при пористости $m = 0,94$ найдем коэффициент кондуктивной теплопроводности базальтовой теплоизоляции: $\lambda_{\text{конд}} = \lambda_{\text{БСТВ}} = 0,0172 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

В настоящее время существует тенденция применения теплоизоляции криогенных трубопроводов на основе маложестких и низкоплотных пенополиуретанов [12] (ППУ-17Н, ППУ-308Н, «Изолан-ИЗ», «Викорт-1М») с плотностью $\rho_{\text{ППУ}} = 50 \dots 80 \text{ кг/м}^3$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{ППУ}} = 0,035 \dots 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако при малоцикловом захлаживании и отогреве низкоплотных покрытий толщиной $h_{\text{ППУ}} = 30 \text{ мм}$ (рис. 6, а) до температуры жидкого азота (77 К) происходит охрупчивание полиуретанового каркаса и его разрушение при относительных деформациях $\varepsilon_{\text{карк}} \approx 2,7 \%$ (рис. 6, б).

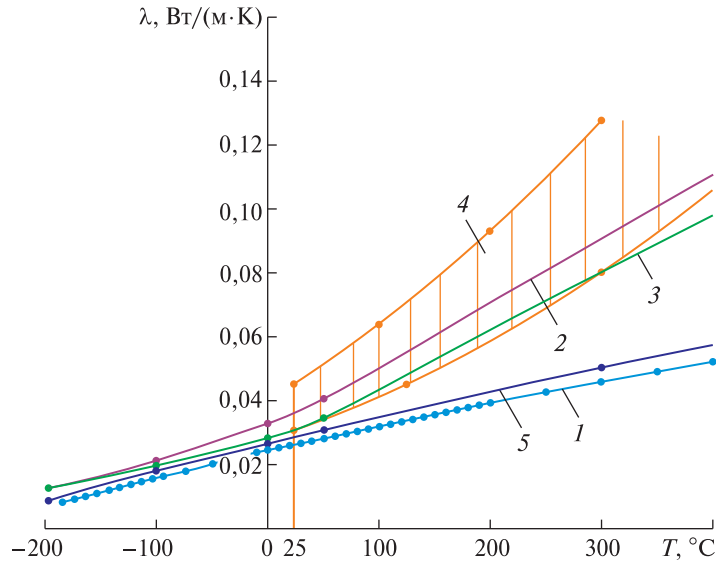


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры:

1 — сухого воздуха; 2, 3 — базальтовые волокна с диаметрами 3 и 1,5 мкм; 4 — базальтовый прошивной мат из штапельных волокон с плотностью 95...125 кг/м³; 5 — расчетная на основе правила суммирования кривая кондуктивной теплопроводности

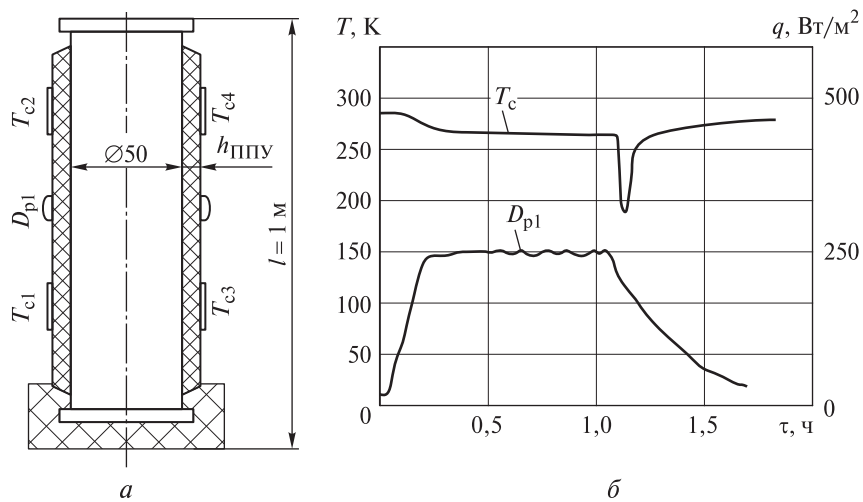


Рис. 6. Схема установки датчиков измерения температуры стенки ($T_{c1}...T_{c4}$) и теплового потока D_{p1} (а); изменения температуры стенки T_c и теплового потока D_{p1} при испытаниях трубопровода жидким азотом (б). Температурный пик — трещина в пенопластовом покрытии трубопровода из пенопласта «Викорт-1М»

Хотя полужесткий пенопласт марки «Викорт-3М» имеет сравнительно большую относительную деформацию разрушения $\varepsilon_{раз} = 12...15\%$ и рабочую температуру в диапазоне $-253...150\text{ }^{\circ}\text{C}$, его

плотность ($\rho_{\text{ППУ}} = 200 \dots 250 \text{ кг/м}^3$) и коэффициент теплопроводности ($\lambda_{\text{ППУ}} = (0,05 \dots 0,06) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ значительно больше соответствующих показателей базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции, рассмотренной выше. Следовательно, выбор теплоизоляции для криогенных топливопроводов на основе коротких базальтовых волокон в настоящее время является своевременным и весьма актуальным.

Учитывая изложенное выше и то, что тепловой поток через изолированную стенку трубопровода для самолета ТУ-155 $q = \frac{q_1}{\pi d_{\text{тр}}} = 250 \pm 5 \text{ Вт/м}^2$ [1], запишем формулу, определяющую толщину базальтовой теплоизоляции для $d_{\text{мп}} = 70 \text{ мм}$ через линейный тепловой поток:

$$q_1 = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}, \quad (6)$$

где $d_1 = 70,6 \text{ мм}$ — диаметр лейнера (см. рис. 2); $d_2 = 71,7 \text{ мм}$ — диаметр намотанного углепластика; $d_3 = (d_2 + 2h_{\text{БСТВ}})$ мм — диаметр базальтовой теплоизоляции; $d_4 = (d_3 + 1)$ мм — внешний диаметр криогенного трубопровода; $\lambda_1 = 0,587 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ — коэффициент теплопроводности углепластика в поперечном направлении; $\lambda_3 \approx 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ — коэффициент теплопроводности полиимидной пленки; $\lambda_2 = \lambda_{\text{БСТВ}}$. Поскольку коэффициенты λ_1 и λ_3 намного больше $\lambda_{\text{БСТВ}}$, а отношение их диаметров мало, в формуле (6) эти слагаемые можно не учитывать.

Тогда толщину базальтового теплоизоляционного покрытия определяем по формуле

$$h_{\text{тип}} = \frac{d_2}{2} \left[\exp \left(2\pi \frac{\lambda_{\text{БСТВ}} \Delta T}{q_1} - 1 \right) \right], \quad (7)$$

где $(T_1 - T_2) = 273 \text{ }^\circ\text{C}$ — перепад температур на внешней и внутренней стенках теплоизоляции. После подстановки числовых значений в формулу (7) получим $h_{\text{тип}} = 24,86 \text{ мм}$, плотность материала теплоизоляционного покрытия при пористости $m = 0,94$ составляет $\rho_{\text{тип}} = (1 - m)\rho_{\text{б.в}} = 165 \text{ кг/м}^3$. Тогда масса базальтовой теплоизоляции на

$$\text{длине } 1 \text{ м } M_{\text{БСТВ}} = \frac{\pi(d_3^2 - d_2^2)\rho_{\text{тип}}}{4} = 1,28 \text{ кг/м.}$$

Теплоизоляционное покрытие трубопровода из коротких базальтовых волокон изготавливают в такой последовательности (рис. 7). Сначала в пресс-форму заливают подготовленную пульпу, состоящую из воды, базальтовых волокон и гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ (рис. 7, а). Потом вводят центральный пуансон (рис. 7, б) и почти сразу два боковых пуансона (рис. 7, в). Затем одновременно все три пуансона (рис. 7, г) нагружают силой $F_{\text{п}} = 2472$ Н, что соответствует удельному давлению $p_{\text{п}} = 59,6$ кПа. Время фильтрационного формования цилиндрических скорлуп при движении пуансонов со скоростью $U_{\text{ф}} = 6$ мм/мин составляет 7...8 мин.

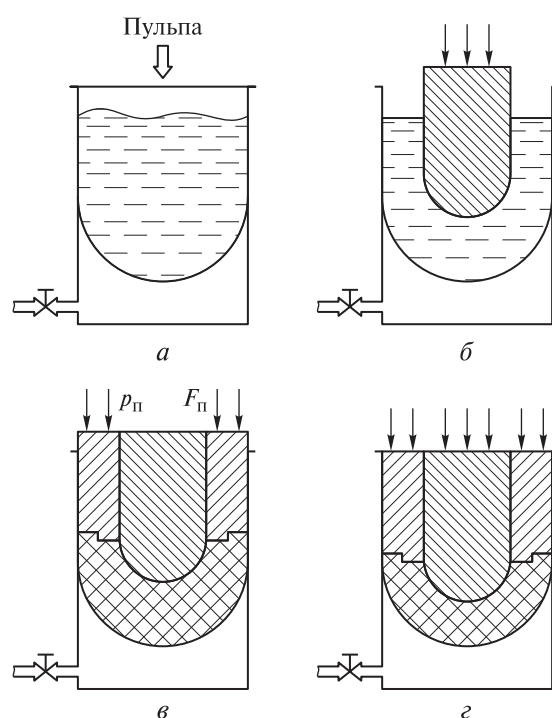


Рис. 7. Последовательность изготовления цилиндрических скорлуп толщиной 25 мм и длиной 255 мм методом фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон из пульпы в перфорированную пресс-форму

Отформованные скорлупы (рис. 8) подвергаются сушке и последующей термообработке при температуре 500 °С в заневоленном состоянии (рис. 8, а) для образования из гидроксида алюминия минеральной связки из Al_2O_3 . Затем готовые изделия (рис. 8, б) извлекают из пресс-формы, собирают с трубопроводом в замок и скрепляют между собой намотанной в два слоя лентой из алюминиевой фольги, служащей также как отражательный экран.

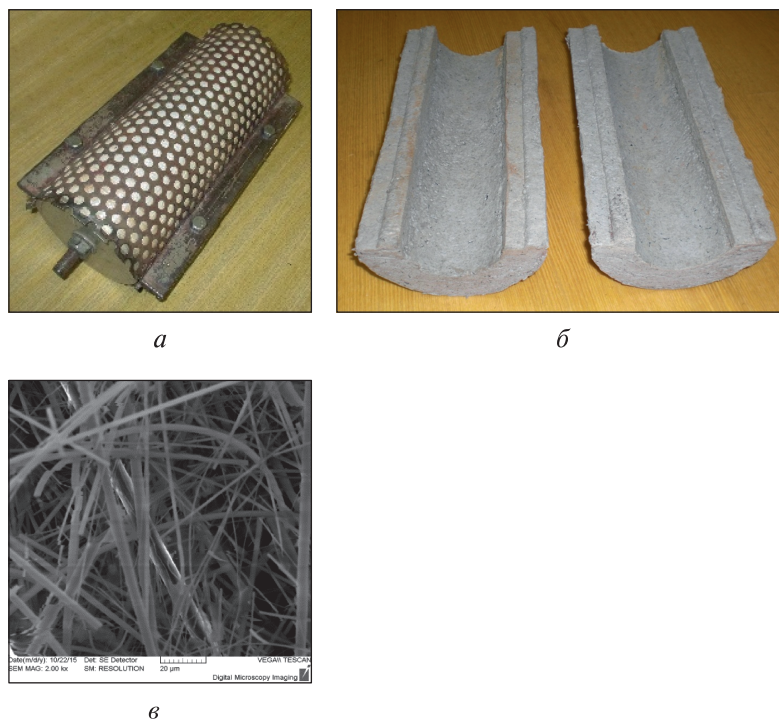


Рис. 8. Общий вид пресс-формы для сушки (а), готовые цилиндрические скорлупы на основе коротких БСТВ (б) и характер распределения базальтовых волокон ($d_b = 0,5...3,5$ мкм) со связкой из Al_2O_3 в плоскости образца под микроскопом (в)

Защитно-герметизирующая оболочка изготавливается методом намотки узких (20 мм) лент из пленки ПМФ-352 толщиной 65 мкм в четыре двойных слоя на разборную металлическую оправку на станке СНП-3. Пленка ПМФ-352 с двух сторон покрыта фторопластом и надежно работает как при повышенных (до 300 °С), так и при криогенных температурах [13–15]. Пленка сохраняет свою гибкость и эластичность вплоть до температуры жидкого гелия (4,2 К). Намотанные слои оболочки обжимаются и подвергаются термообработке при температуре 325 °С в течение 45 мин, в результате которой происходит термоспекание слоев в единый монолитный материал. Масса полиимидной оболочки длиной 1 м и двух крышек (см. рис. 2) $M_{\text{ПМФ}} = \pi d_4 h_{\text{ПМФ}} \rho_{\text{ПМФ}} \approx 0,28$ кг/м, где $\rho_{\text{ПМФ}} = 1350$ кг/м³.

Готовую оболочку натягивают на теплозащитное покрытие из базальтовых волокон трубопровода и приматывают арамидной нитью к опорному кольцу (см. рис. 2, поз. 9) из углепластика. Торцевые изолирующие крышки 7, отформованные из многослойной полиимидной пленки ПМФ-352, приматывают к цилиндрической канавке фланца стальной (12Х18Н10Т) проволокой, а к опорному кольцу —

армопластиком. Окончательная масса композитного теплоизолированного топливопровода $M_{\text{топ}} = M_{\text{тр}} + M_{\text{БСТВ}} + M_{\text{ПМФ}} = 2,53$ кг/м.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Спроектирован композитный криогенный топливопровод, в состав которого входят трубопровод из комбинированных материалов, теплоизолирующее покрытие из коротких базальтовых волокон с минеральной связкой из Al_2O_3 и защитно-герметизирующая оболочка из полиимидно-фторопластовой пленки ПМФ-352, работоспособный при температурах $-260...150$ °С. Проведена оптимизация всех элементов конструкции трубопровода $d_y = 70$ мм, обеспечившая получение погонной массы, равной 2,53 кг/м, что в 2,0–2,5 раза меньше массы равновеликого криогенного топливопровода (термокейса) с экранно-вакуумной теплоизоляцией.

2. Применение теплоизолирующего покрытия из коротких базальтовых супертонких волокон в криогенных трубопроводах обеспечивает экологическую чистоту, негорючесть, малую плотность и низкий коэффициент теплопроводности, равный 0,0172 Вт/(м·К) в диапазоне температур $-260...20$ °С.

3. Представлены основные технологические этапы изготовления теплоизолирующего покрытия трубопровода методом жидкостной фильтрации коротких базальтовых волокон из пульпы в перфорированную пресс-форму и изготовление из полиимидной пленки ПМФ-352 защитно-герметизирующей оболочки методом намотки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т. и др. *Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации: Справочник-воспоминание для всех*. Москва, Московский рабочий, 2001, 223 с.
- [2] Федоров Г., Максимович Г. Самолет завтрашнего дня — Ту-155 на водородном топливе: АНТК им. А.Н. Туполева. *Крылья Родины*, 1988–1992.
- [3] Патрунов Ф.Г. *Ниже 120 градусов по Кельвину*. Москва, Знание, 1989, 176 с.
- [4] Журавин Ю. «Море» планов «Ангары». *Новости космонавтики*, 1999, № 3 (194), с. 48–49.
- [5] Комков М.А., Потапов Д.А., Кудрявцев А.А. Оптимизация угла намотки на металлический лейнер криогенного трубопровода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [6] Баданина Ю.В. *Технологическое проектирование высокопористых теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон на основе метода жидкостной фильтрации*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 16 с.
- [7] Базальтовое супертонкое волокно «MINOL». *Завод БСТВ «MINOL»*: сайт компании. URL: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (дата обращения 05.01.2018).
- [8] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Моисеев А.В. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-

- компрессорных труб. *Наука и образование. Электронный журнал*, 2015, № 4. DOI: 10.7463/0315.0761820
- [9] Комков М.А., Тарасов В.А., Бородулин А.С. Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 4, с. 78–85.
- [10] *Материал прошивной базальтовый огнезащитный рулонный (МПБОР) по ТУ 5769-004-02500345-2009*. URL: <http://www.bztm.su/vbor.php> (дата обращения 05.09.2016).
- [11] Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. *Основы производства базальтовых волокон и изделий*. Москва, Теплоэнергетик, 2002, 416 с.
- [12] *Вспененные пластические массы: сб. тр. НПО «Полимерсинтез», т. 1*. Москва, НИИТЭхим, 1990, 224 с.
- [13] Бессонов М.П., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. *Полиимиды — класс термостойких полимеров*. Ленинград, Наука, 1983, 328 с.
- [14] Буланов И.М., Комков М.А. Применение жестких полимерных пленок в криогенных топливных системах аэрокосмической техники. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1992, № 1, с. 14–24.
- [15] Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 1, с. 16–20.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Баданина Ю.В., Потапов Д.А., Новикова А.С. Криогенный трубопровод с коротковолокнистой базальтовой теплоизоляцией. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1825>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения и композитных конструкций. e-mail: cm12@cm.bmstu.ru; m_komkov@list.ru

Баданина Юлия Владимировна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения и композитных конструкций. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Потапов Дмитрий Алексеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух статей в области технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: potapov-dmitrij94@mail.ru

Новикова Анастасия Сергеевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух статей в области технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: 79163864045@ya.ru

Cryogenic pipeline with short fiber basalt insulation

© M.A. Komkov, Yu.V. Badanina, D.A. Potapov, A.S. Novikova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper shows the importance of making pipelines for supplying cryogenic fuel components to aircraft propulsion systems with super-thin basalt fiber insulation and Al_2O_3 mineral binder. In our research, we consider the design and technology solution of a cryogenic fuel pipe consisting of a thin-walled pipeline made of combined materials based on an ultra-thin steel liner and wound carbon fiber reinforced plastics. The optimization of the mass of the pipe flange ending was carried out together with the combined pipeline shell. The thickness and mass of the basalt heat insulation of the pipeline were determined according to the engineering technique for calculating the effective thermal conductivity of a highly porous fibrous coating material. The study shows that the pipeline with basalt thermal insulation has a significantly smaller mass than the cryogenic fuel line with screen-vacuum heat insulation used in the TU-155 airplane.

Keywords: heat-insulated pipeline, combined shell, cryogenic temperature, high porosity basalt heat insulation

REFERENCES

- [1] Andreev V.A., Borisov V.D., Klimov V.T. et al. *Vnimanie: gazy. Kriogennoe toplivo dlya aviatsii. Spravochnik-vospominanie dlya vsekh* [Attention: gases. Cryogenic Fuel for Aviation: A Handbook of Recollection for All]. Moscow, Moskovskiy rabochiy Publ., 2001, 223 p.
- [2] Fedorov G., Maksimovich G. *Krylya rodiny (Wings of the Motherland)*, 1988–1992.
- [3] Patrunc F.G. *Nizhe 120 gradusov po Kelvinu* [Below 120 degrees Kelvin]. Moscow, Znaniye Publ., 1989, 176 p.
- [4] Zhuravin Yu. *Novosti kosmonavtiki (Cosmonautics news)*, 1999, no. 3 (194), pp. 48–49.
- [5] Komkov M.A., Potapov D.A., Kudryavtsev A.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [6] Badanina Yu.V. *Tekhnologicheskoye proektirovanie vysokoporistyykh teploizoliruyuschikh konstruksiy iz korotkikh bazaltovykh volokon na osnove metoda zhidkostnoy filtratsii. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Technological design of high-porosity heat-insulating short-fiber basalt structures based on the method of liquid filtration. Cand. eng. sc. author's abstr.]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 16 p.
- [7] Bazaltovoye supertonkoye volokno «MINOL» [Basalt super-thin fiber “MINOL”]. *Zavod BSTV «MINOL»* [BSTF “MINOL” plant]. Available at: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (accessed January 5, 2018).
- [8] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P., Moiseev A.V. *Nauka i Obrazovanie — Science and Education*, 2015, no. 4. DOI: 10.7463/0315.0761820
- [9] Komkov M.A., Tarasov V.A., Borodulin A.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 4, pp. 78–85.
- [10] *Material proshivnoy bazaltovyy ognezashchitnyy rulonnyy (MPBOR) po TU 5769-004-02500345-2009* [Material fireproof basalt pierced basalt (MPOR) ac-

- coding to TU 5769-004-02500345-2009]. Available at: <http://www.bztm.su/vbor.php> (accessed September 5, 2016).
- [11] Dzhigiris D.D., Makhova M.F. *Osnovy proizvodstva bazaltovykh volokon i izdeliy. Monografiya* [Fundamentals of production of basalt fibers and products. Monograph]. Moscow, Teploenergetik Publ., 2002, 416 p.
- [12] *Vspenennyye plasticheskiye massy. Sbornik trudov. Tom 1* [Foamed plastic masses. Vol. 1]. Moscow, NIITEKhIM Publ., 1990, 224 p.
- [13] Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Layus L.A. *Poliimidy — klass termostoykikh polimerov* [Polyimides — a class of heat-resistant polymers]. Leningrad, Nauka Publ., 1983, 328 p.
- [14] Bulanov I.M., Komkov M.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 14–24.
- [15] Sabelnikov V.V., Komkov M.A., Samoryadov A.V. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science. Series D*, 2005, no. 1, pp. 16–20.

Komkov M. A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 140 scientific papers in the field of rocket and space engineering technology and composite structures. e-mail: cm12@cm.bmstu.ru; m_komkov@list.ru

Badanina Yu.V., Assistant Lecturer, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 15 scientific works in the field of rocket and space engineering and composite structures. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Potapov D.A., a student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of two articles in the field of rocket and space engineering technology. e-mail: potapov-dmitrij94@mail.ru

Novikova A.S., student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of two articles in the field of rocket and space engineering technology. e-mail: 79163864045@ya.ru