

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 539.3:678.067

doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-86-92

Проектирование и технология намотки криволинейных трубопроводов из спекаемой полиимидно-фторопластовой пленки

М.А. Комков, Ю.В. Баданина

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Design and Technology of Winding Curvilinear Pipelines from Sintered Polyimide-Fluoroplastic Film

M.A. Komkov, Y.V. Badanina

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления легких и надежных в эксплуатации трубопроводов из композиционных материалов для ракетной техники, авиации и наземного транспорта, работающих на криогенных топливах. Полученные намоткой из полиимидных пленок многослойные прямо- и криволинейные трубопроводы позволяют существенно снизить массу и уровень изгибных нагрузок. В статье показаны геометрия типового элемента криволинейного трубопровода и оформление фланца криогенного трубопровода. Предложен способ соединения хвостовика фланца с пленочной оболочкой. Приведены результаты испытаний трубопроводов из полиимидно-фторопластовых пленок. Криогенные трубопроводы из полиимидной пленки ПМФ-352 имеют меньшую массу по сравнению с металлическими аналогами из сплава АМг-6 и могут быть рекомендованы для их замены в пневмогидросистемах изделий, работающих на криогенных топливах.

Ключевые слова: криогенное топливо, полиимидная пленка, пленочная оболочка, криволинейные трубопроводы, метод намотки

This article deals with the issues related to designing and manufacturing light and reliable pipelines made of composite materials for missile technology, aircraft and land vehicles running on cryogenic fuel. Multi-layer straight and curvilinear pipelines made by winding polyimide films can significantly reduce the weight and level of bending loads. The article presents the geometry of a typical element of a curvilinear pipeline and the design of the flange of a cryogenic pipeline. A method for connecting the flange shank to the film shell is proposed and the results of testing pipelines made of polyimide-fluoroplastic films are presented. Cryogenic pipelines made of polyimide film PMF-352 have a smaller mass in comparison with metal analogues made of alloy AMg-6 and can be recommended as their replacement in pneumatic hydraulic systems of products operating on cryogenic fuels.

Keywords: cryogenic fuel, polyimide film, film shell, curvilinear pipelines, winding method

Пневмогидросистемы (ПГС) летательных аппаратов — топливные баки ракет-носителей «Ангара» [1], разгонные блоки 12КРБ и КВРБ [2], самолеты ТУ-155 и ТУ-156 [3] — оснащены большим количеством внутрибаковых прямо- и криволинейных трубопроводов, выполненных из алюминиевого сплава АМг-6 и имеющих излишне большие погонную массу и изгибную жесткость.

Внутрибаковые трубопроводы двигательных установок ракетно-космической техники, авиации и наземного транспорта, работающих на криогенных топливах [4] (жидком кислороде, водороде или метане) при пиковом давлении до 5 МПа и более, могут быть выполнены намоткой узких (20...40 мм) лент из жестких лавсановых (ПЭТФ-0) или полиимидно-фторопластовых (ПМФ-352) пленок толщиной 45...60 мкм.

Таким образом, проектирование и изготовление легких и надежных в эксплуатации трубопроводов из таких композиционных материалов, как лавсан, полиимид, полиимид + композит, для жидкого водорода, кислорода или метана является актуальной задачей.

Цель работы — исследование возможности существенного снижения массы и уровня изгибных нагрузок криогенных криволинейных трубопроводов путем их изготовления из пленочных композиционных материалов намоткой при обеспечении прочности и допустимых перемещений фланцев труб в процессе их сборки и монтажа.

Описание материала и конструкции. Диаграмма одноосного растяжения указанных пленок при нормальной температуре показывает, что 3/4 их предела прочности реализуется в зоне упругих деформаций, близких к разрушающим деформациям однонаправленных стекло-, угле- и органопластиков. Однако тер-



Рис. 1. Внешний вид тороидальной оболочки из полиимидной пленки, имеющей следующие геометрические параметры:

диаметр тора — 400 мм, диаметр сечения тора — 80 мм, объем оболочки — 5,1 дм³, параметр изгиба тора — 4

мо- и морозостойкость лавсановых пленок ПЭТФ-0, приводящие к хрупкому разрушению материала оболочки [5] при температуре более 423 К и менее 173 К, нельзя использовать для изготовления криогенных трубопроводов, работающих на жидком водороде и кислороде или метане.

Результаты криогенных испытаний тороидальных оболочек из полиимидной пленки (рис. 1) внутренним давлением жидкого азота (температурой 77 К), проведенных в Центральном научно-исследовательском институте машиностроения [6], показали, что максимальные двухосные напряжения на большом экваторе оболочки в момент разрушения составляют 112 МПа, модуль упругости — 10...11 ГПа, максимальные деформации разрушения — 2,96 %, коэффициент Пуассона — 0,26. Пленка ПМФ-352 сохраняет свою гибкость и эластичность вплоть до температуры жидкого гелия (4,2 К), причем ее прочность при температуре 150 °С достаточно высока (57...60 МПа).

Техническая характеристика жестких полимерных пленок при нормальной температуре

Марка	ПЭТФ-0 (ТУ6-05-1099-76)	ПМФ-352 (ТУ6-05-051-76)
Тип	Лавсановая	Полиимидная
Толщина, мкм.....	45	60
Плотность, кг/м ³	1380	1420
Предел прочности, МПа.....	120...175	90...120
Модуль упругости, ГПа	2,9...3,8	2,8...3,0
Термостойкость, К (°С)	423 (150)	673 (250...400)
Морозостойкость, К (°С).....	173 (-100)	4,2 (-269)
Усадка, %	3,0	0,5

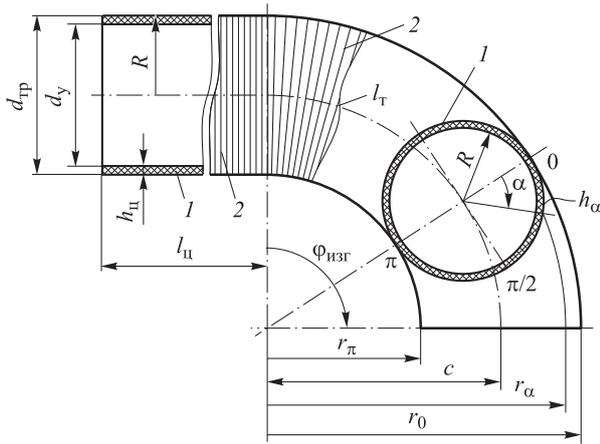


Рис. 2. Конструктивная схема типового элемента криволинейного трубопровода и его система координат:

1 — оболочка из полиимидной пленки ПМФ-352;
 2 — схема намотки узких лент на криволинейную поверхность трубопровода; $d_{тр}$ — диаметр трубопровода; d_y — внутренний диаметр трубопровода; R — радиус сечения; $h_{ц}$ — толщина цилиндрической части; $l_{ц}$ и $l_{т}$ — длины цилиндрической и торовой частей; c — расстояние от оси вращения до вершины тора; α — угол (широта) торовой части; h_{α} — толщина тора на широте α ; r_{α} — радиус вращения по широте α ; r_0 и r_{π} — максимальный и минимальный радиусы вращения тора; $\varphi_{изг}$ — угол изгиба трубы

Это свидетельствует о возможности использования полиимидной пленки с двусторонним нанесенным фторопластовым покрытием толщиной 6...8 мкм (ПМФ-352) в качестве силовых и герметизирующих оболочек криогенных трубопроводов, применение которых снижает уровень изгибных нагрузок и обеспечивает требуемые перемещения фланцев труб при их сборке и монтаже.

Это, с одной стороны, позволяет отказаться от большинства компенсаторов перемещения (сильфонов) в системе ПГС и снизить примерно вдвое давление гидроудара, а с другой — в разы увеличить несущую способность трубопроводов путем дополнительной спирально-поперечной намотки сверху на пленочную оболочку полимерно-волоконного композиционного материала.

Конструкция криволинейного трубопровода. Криволинейный трубопровод (рис. 2) состоит из двух участков (частей) — прямого и изогнутого, выполненных отдельно. В другом варианте его конструкции участки изготовлены намоткой совместно. Впервые несколько комплектов внутрибаковых прямо- и криволинейных трубопроводов диаметром 36...72 мм были изготовлены методом намотки из пленки ПМФ-352 в МГТУ им. Н.Э. Баумана на станке СНП-3 для криогенного разгонного блока 12КРБ с тягой 120 кН, разработанного в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (по заказу Правительства Индии).

Членение на совместные прямо- и криволинейные элементы позволяет компоновать нитку трубопровода любой пространственной конфигурации. Изогнутый участок трубопровода (часть тороидальной оболочки) образован вращением окружности радиусом R вокруг центральной оси кругового тора на угол изгиба $\varphi_{изг}$ (см. рис. 2). Прямолинейный (цилиндрический) участок имеет такой же радиус сечения и длину $l_{ц}$.

Оформление фланца криогенного трубопровода показано на рис. 3. Для обеспечения герметичности оболочка [7] из полиимидной пленки в области фланца разделена на две части — сверху

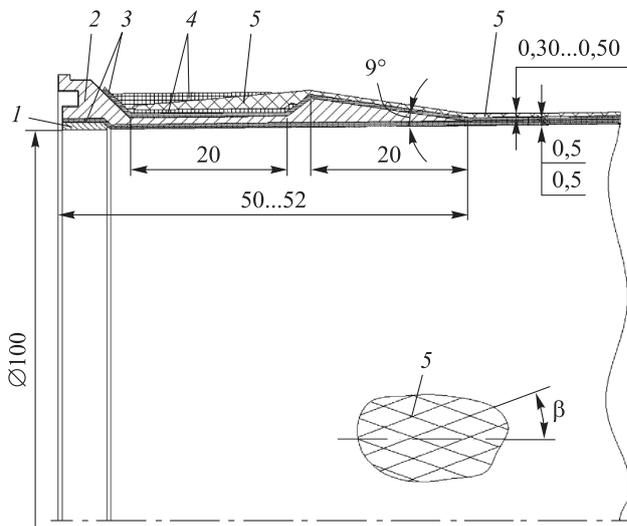


Рис. 3. Схема законцовки трубопровода:

1 — кольцо распорное (сталь); 2 — фланец из 12X18H10T; 3 — оболочка из ПМФ-352; 4 — проволока $\varnothing 100$ мкм (сталь, радиальная намотка); 5 — углепластик (спиральная намотка); β — угол армирования

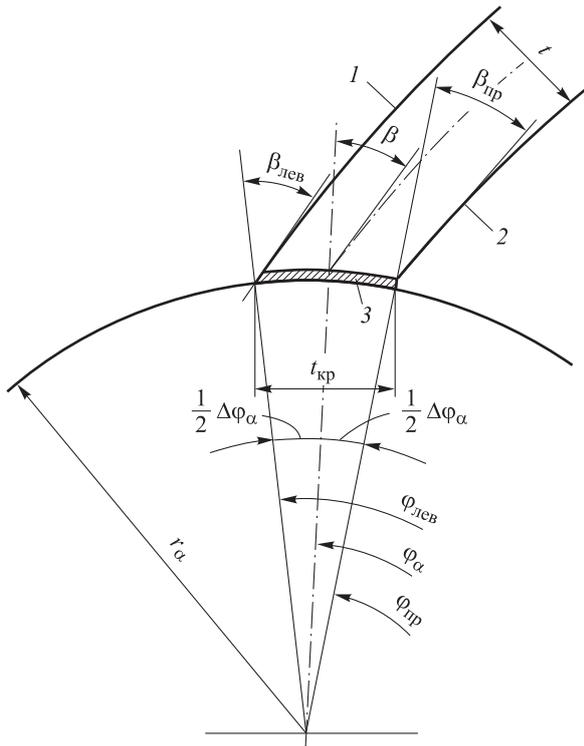


Рис. 4. Схема намотки ленты шириной t_l на тороидальную поверхность на расстоянии r_α от оси вращения тора:

1 и 2 — края ленты; 3 — поперечное сечение ленты на поверхности тора; $\beta_{лев}$ и $\beta_{пр}$ — углы намотки левого и правого краев ленты на расстоянии $r_\alpha = R(a + \cos\alpha)$ от оси вращения тора; φ_α , $\varphi_{лев}$ и $\varphi_{пр}$ — угловое положение середины ленты, ее левого и правого краев соответственно; $\Delta\varphi_\alpha$ и $t_{кр} = r_\alpha \Delta\varphi_\alpha$ — угловая и кроющая ширина ленты на радиусе вращения r_α

примотана стальной проволокой, а снизу обжата распорным стальным кольцом. В процессе захолаживания и отогрева трубопровода пленочная оболочка, заземленная между стальными элементами, перемещается вместе с ними, гарантируя герметичность изделия.

Технологическое проектирование и изготовление методом намотки криволинейных трубопроводов. Пусть центральная ось ленты пересекает меридиан тора под расчетным углом армирования $\beta = \beta_\alpha$, где β_α — угол оси ленты (рис. 4) на широте r_α изгиба трубопровода.

Предположим также, что лента шириной t_l при намотке на криволинейную или тороидальную оправку (рис. 5) может изгибаться в своей плоскости, но ее нормальная ширина остается постоянной, т. е. отсутствует жгутование ленты.

В этом случае угловое положение середины ленты $\varphi = \varphi_\alpha$ на расстоянии r_α определяется выражением [8–10]

$$\varphi = \varphi_\alpha = \int_0^\alpha \frac{\text{tg}\beta_\alpha}{a + \cos\alpha} d\alpha, \quad (1)$$

где a — геометрический параметр тора, $a = c/R$ (см. рис. 2).

Тогда в соответствии с обозначениями рис. 4 для угловых положений левого $\varphi_{лев}$ и правого $\varphi_{пр}$ краев ленты можно записать

$$\begin{aligned} \varphi_{лев} = \varphi_{пр} = \varphi \pm \frac{1}{2} \Delta\varphi = \varphi_\alpha \pm \\ \pm \frac{t_l}{2R} \frac{1}{(a + \cos\alpha) \cos\beta_\alpha} = \int_0^\alpha \frac{\text{tg}\beta_{лев,пр}(\alpha)}{a + \cos\alpha} d\alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

После подстановки значения угла φ_α из выражения (1) в формулу (2), дифференцирования и алгебраических преобразований получим

$$\begin{aligned} \text{tg}\beta_{лев,пр} = \text{tg}\beta_\alpha \mp \\ \mp \frac{t_l}{2R} \left(\frac{\sin\alpha}{a + \cos\alpha} - \frac{\cos\beta'_\alpha}{\cos\beta_\alpha} \right) \frac{1}{\cos\beta_\alpha}, \end{aligned} \quad (3)$$

где β'_α — производная от функции угла намотки середины ленты по координате α .

Выражение (3) представляет собой общее уравнение углов намотки кривых, расположенных от расчетной траектории на расстоянии, равном половине ширины наматываемой ленты ($t_l/2$). При поперечной намотке ленты на криволинейный участок трубы с малой долей погрешности можно принять, что $\beta_\alpha = 0$. Тогда из формулы (3) имеем

$$\text{tg}\beta_{лев,пр} = \pm \frac{t_l}{2R} \frac{\sin\alpha}{(a + \cos\alpha)}. \quad (4)$$

Теперь определим длину кривой по левому и правому краям укладки ленты из дифференциального соотношения $dl_{лев,пр} = ds / \cos\beta_{лев,пр}$ [6, 9], где $ds = R d\alpha$ — элемент дуги образующей тора. После подстановки в него $\cos\beta_{лев,пр}$ из выражения (4) получим уравнение, описывающее траекторию укладки краев ленты на тороидальную поверхность, когда осевая линия ленты укладывается по расчетной траектории

$$l_\tau = 2R \int_0^\pi \sqrt{1 + \frac{\tau_l^2 \sin^2 \alpha}{(a + \cos\alpha)^2}} d\alpha, \quad (5)$$

где l_τ — длина витка намотки относительно текущей ширины ленты; τ_l — относительная ширина ленты, $\tau_l = t_l / 2R$.

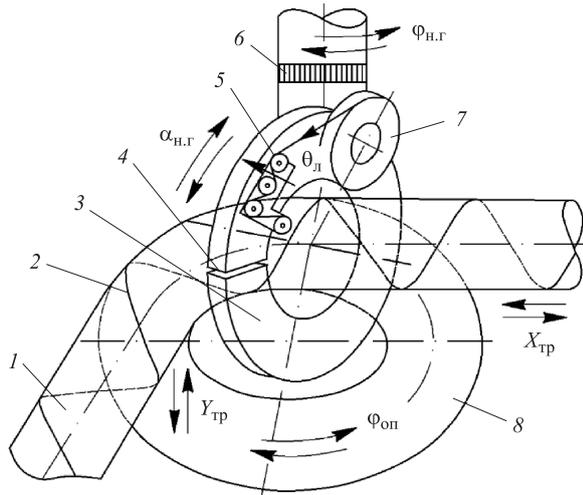


Рис. 5. Схема намотки тороидальных конструкций на станке СНП-3:

- 1 — оправка криволинейного трубопровода;
- 2 и 5 — наматываемая лента и ее раскладчик;
- 3, 4 и 6 — намоточная головка, ее разъем и вертлюг соответственно;
- 7 — катушка с намоточным материалом;
- 8 — тороидальная оправка;
- φ_{н.г.} и θ_{л.} — углы поворота намоточной головки (вертлюга) и ленты;
- X_{тр.}, Y_{тр.} — координаты перемещения оправки (трубопровода);
- α_{н.г.} и φ_{оп.} — углы вращения намоточной головки и тороидальной оправки

Минимальная необходимая сила натяжения ленты при намотке, обеспечивающая ее плотное прилегание к оправке, определяется выражением

$$q_{н.л}^{min} = \sigma_{пл} t_l h_l = \varepsilon_{ср}(\tau_l) E_{пл} t_l h_l, \quad (6)$$

где σ_{пл} — среднее напряжение ленты при намотке; h_л — толщина ленты; E_{пл} — модуль упругости пленки ПМФ-352; ε_{ср}(τ_л) — средняя минимально необходимая деформация ленты от натяжения (рис. 6) при намотке ее вдоль меридиана тора или изгиба трубопровода.

Переменная деформация ленты ε_τ = l_τ / (2πR) - 1. Согласно рис. 6, а, средняя минимально необходимая деформация ленты от натяжения вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{ср}(\tau_l) = \frac{2}{\tau_l} \int_0^{\tau_l/2} \varepsilon_{\tau} d\tau = \frac{2}{\tau_l} \int_0^{\tau_l/2} \left(\frac{l_{\tau}}{2\pi R} - 1 \right) d\tau. \quad (7)$$

Минимально необходимая сила натяжения ленты при намотке, обеспечивающая ее плотное прилегание к оправке, определяется из соотношения (6) путем подстановки в него выражений (5) и (7). После преобразований получим

$$q_{н.л}^{min} = E_{пл} t_l h_l \times \left[\frac{2}{\tau_l} \int_0^{\tau_l/2} \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{1 + \frac{\tau^2 \sin^2 \alpha}{(a + \cos \alpha)^2}} d\alpha - 1 \right) d\tau \right]. \quad (8)$$

На рис. 6, б приведена зависимость минимально необходимой силы натяжения ленты q_{н.л}^{min} от параметра изгиба трубы a для трех значений относительной ширины ленты τ_л, рассчитанных по выражению (8) при E_{пл} = 3,0 ГПа, t_л = 20 мм и h_л = 60 мкм. В действительности при намотке полиимидной ленты ПМФ-352 принято, что натяжение в 2 раза больше расчетного значения.

Важным достоинством пленки ПМФ-352 является ее спекаемость (свариваемость) при нагревании до температуры размягчения фторопластового покрытия (T = 325 °С), что при соответствующем обжиге многослойного пле-

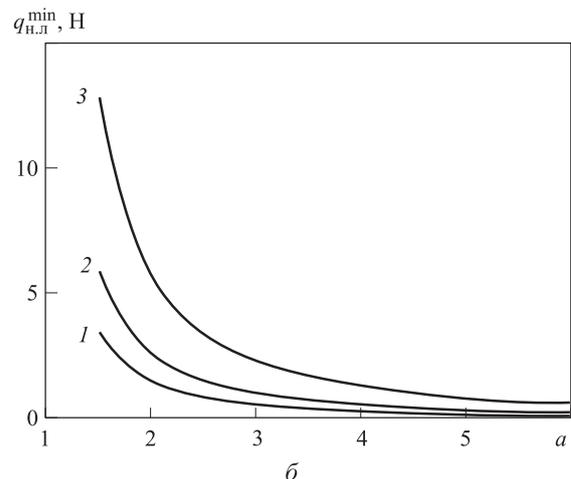
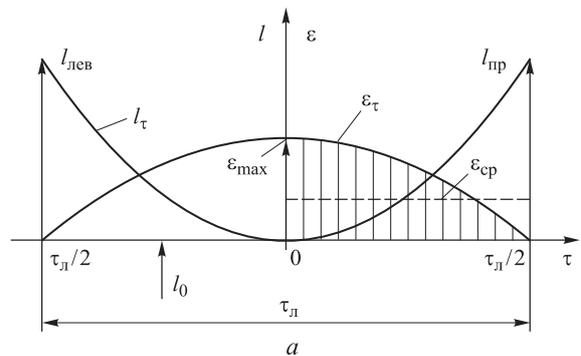


Рис. 6. К выбору минимального натяжения наматываемой ленты:

- a — длина витка l и деформация наматываемой ленты ε относительно текущей ширины ленты τ;
- l₀ = 2πR — минимальная длина витка; ε_{max} — максимальная деформация ленты по меридиану тора;
- б — зависимость минимально необходимой силы натяжения ленты q_{н.л}^{min} от параметра изгиба трубы a при относительной ширине ленты τ_л = 1/4 (1), 1/3 (2) и 1/2 (3)

ночного пакета обеспечивает надежную герметичность и достаточную прочность оболочки трубопровода. Пленка не токсична до температуры 250 °С. Конструкции трубопроводов, изготовленные из пленки ПМФ-352, стойки к воздействию практически всех газов, к жидким водороду, кислороду, керосину и их парам.

Результаты испытаний трубопроводов

Вид испытаний	Степень негерметичности трубопроводов, м ³ ·Па/с
Входной контроль	5·10 ⁻⁸
Транспортные	9·10 ⁻⁸
Термоциклические	6·10 ⁻⁸
Вибрационные	9·10 ⁻⁸
Испытания на перемещение	6·10 ⁻⁸

Трубопроводы в форме цилиндра и колена проходили входной контроль на герметичность (см. таблицу), а затем испытания на рабочие нагрузки и вновь на герметичность. Установлено, что степень негерметичности трубопрово-

дов в форме цилиндра и колена лежит в допустимых пределах (не более 1·10⁻⁷ м³·Па/с).

Вывод

Технология изготовления криогенных трубопроводов из полиимидной пленки ПМФ-352 является непростой, требует обжата намотанных слоев пленки и применения цельных или разборных стальных оправок, обеспечивающих прочность оснастки при температуре спекания пакета 325 ~С. Однако такие криволинейные трубопроводы могут быть изготовлены намоткой только за одну операцию, способны работать в среде жидкого кислорода или водорода, обладают достаточной прочностью и герметичностью. Они имеют меньшую (примерно на 20 %) массу по сравнению с металлическими аналогами из сплава АМг-6 и могут быть рекомендованы для их замены в ПГС изделий, работающих на криогенных топливах.

Литература

- [1] Журавин Ю. «Море» планов «Ангары». *Новости космонавтики*, 1999, № 3(194), с. 48–49.
- [2] Мохов В. Первый разгонный блок 12КРБ отправлен в Индию. *Новости космонавтики*, 1998, № 21/22, с. 42–43.
- [3] Федоров Г., Максимович Г. *Самолет завтрашнего дня — Ту-155 на водородном топливе: АНТК им. А.Н. Туполева*. Москва, Крылья Родины, 1988–1992.
- [4] Патрунов Ф.Г. *Ниже 120 градусов по Кельвину*. Москва, Знание, 1989. 176 с.
- [5] Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Мартинкевич А.Л., Дроздова Д.А. *Полиимиды. Синтез, свойства, применение*. Минск, БГТУ, 2002. 303 с.
- [6] 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.
- [7] Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 1, с. 16–20.
- [8] Комков М.А. Проектирование конструкции и технологии изготовления намоткой из композиционных материалов оболочек торовых сосудов давления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 3, с. 51–65.
- [9] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
- [10] Комков М.А., Потапов Д.А., Кудрявцев А.А. Оптимизация угла намотки углепластика на металлический лейнер криогенного трубопровода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 9. URL: <http://www.engjournal.ru/articles/1673/1673.pdf> (дата обращения 15 января 2019), doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673

References

- [1] Zhuravin Yu. “Sea” plans “Angara”. *Novosti kosmonavtiki*, 1999, no. 3 (194), pp. 48–49 (in Russ.).
- [2] Mokhov V. The first overlocking unit 12KRB sent to India. *Novosti kosmonavtiki*, 1998, no. 21/22, pp. 42–43 (in Russ.).

- [3] Fedorov G., Maksimovich G. *Aircraft of tomorrow — Tu-155 on hydrogen fuel: ASTC named after A.N. Tupolev*. Moscow, Kryl'ya Rodiny, 1988–1992 (in Russ.).
- [4] Patrunev F.G. *Nizhe 120 gradusov po Kel'vinu* [Below 120 Kelvin]. Moscow, Znanie publ., 1989. 176 p.
- [5] Krut'ko E.H., Prokopchuk N.R., Martinkevich A.L., Drozdova D.A. *Poliimidy. Sintez, svoystva, primeneniye* [Polyimides. Synthesis, properties, application]. Minsk, BSTU publ., 2002. 303 p.
- [6] Bulanov I.M., Komkov M.A. The use of rigid polymer films in cryogenic fuel systems for aerospace engineering. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 14–24 (in Russ.).
- [7] Sabel'nikov V.V., Komkov M.A., Samoryadov A.V. Technology of gluing elements of a cryogenic pipeline. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 1, pp. 16–20 (in Russ.).
- [8] Komkov M.A. Design of Construction and Production Process for Manufacturing by Winding Composite Shells of Torus-Shaped Pressure Vessels. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2004, no. 3, pp. 51–65 (in Russ.).
- [9] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktsiy raket i sredstv porazheniya* [The technology of winding composite structures of missiles and means of destruction]. Moscow, Bauman Press, 2011. 431 p.
- [10] Komkov M.A., Potapov D.A., Kudryavtsev A.A. Optimizing the angle of winding carbon fiber reinforced plastic on the metal liner of the cryogenic pipeline. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 9. Available at: <http://www.engjournal.ru/articles/1673/1673.pdf> (accessed 15 January 2019), doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673

Статья поступила в редакцию 22.04.2019

Информация об авторах

КОМКОВ Михаил Андреевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

БАДАНИНА Юлия Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: julia555-90@yandex.ru).

Information about the authors

KOMKOV Mikhail Andreevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

BADANINA Yulia Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: julia555-90@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комков М.А., Баданина Ю.В. Проектирование и технология намотки криволинейных трубопроводов из спекаемой полиимидно-фторопластовой пленки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 10, с. 86–92, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-86-92

Please cite this article in English as:

Komkov M.A., Badanina Y.V. Design and Technology of Winding Curvilinear Pipelines from Sintered Polyimide-Fluoroplastic Film. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 10, pp. 86–92, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-86-92