

## Определение конструкторско-технологических параметров намотки герметичных топливопроводов из полимерной пленки

© Г.Е. Нехороших

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

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с технологией изготовления топливопроводов из пленочных материалов методом намотки и с оценкой их герметичности по отношению к газообразным и жидким компонентам топлива. Такие топливопроводы применяются в системе подачи топлива криогенного разгонного блока 12 КРБ. Герметичность оболочки полимерного топливопровода определяется как физико-химическими параметрами пленочного материала (коэффициенты проницаемости и диффузии), так и конструктивно-технологическими параметрами наматываемой оболочки. В качестве расчетной модели герметизирующей оболочки топливопровода использована многослойная пленочная конструкция оболочки, изготовленная намоткой узкой полимерной ленты. Определены основные конструктивно-технологические параметры процесса намотки, обеспечивающие требуемую герметичность.*

**Ключевые слова:** разгонный блок, ракетный двигатель, жидкий водород, трубопровод, полимерная пленка, многослойная намотка, герметичность, коэффициент проницаемости, диффузия, расчетная модель, конструкторско-технологические параметры

**Введение.** Разрабатываемые перспективные ракеты-носители позволяют существенно повысить массу выводимых на орбиту полезных грузов. Для таких ракет-носителей требуется создать высокоэффективные двигатели, имеющие большую надежность и высокие энергомассовые характеристики. Благодаря комплексу физических и термодинамических свойств (высокий удельный импульс, экологическая чистота, неограниченные запасы компонентов и др.) кислородно-водородное топливо является наиболее предпочтительным для использования в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) разгонных блоков космических ракет-носителей [1]. В конструкции криогенного разгонного блока 12КРБ нашел применение ЖРД КВД-1 разработки КБХМ им. А.М. Исаева на компонентах топлива «жидкий кислород + жидкий водород» [2]. Этот блок обеспечивает выведение космических аппаратов на геопереходную орбиту в составе ракеты-носителя GSLV (Geosynchronous Satellite Launch Vehicle, Индия) с космодрома Шрихарикота.

В составе конструкции криогенного разгонного блока 12КРБ для подачи компонентов топлива (жидкие  $H_2$  и  $O_2$ ) нашли применение трубопроводы из полимерной (полиимидной) пленки ПМФ-352.

Трубопроводы прямолинейной и криволинейной формы изготавливали методом намотки в лаборатории композиционных материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Рабочие температуры топливных магистралей (до 20 К) затрудняют применение традиционно используемых для этих целей металлических сплавов. Ввиду высоких значений температурных деформаций в интервале 293...23 К [3] требуется включать в состав трубопроводной арматуры различные компенсаторы, существенно усложняющие конструкцию.

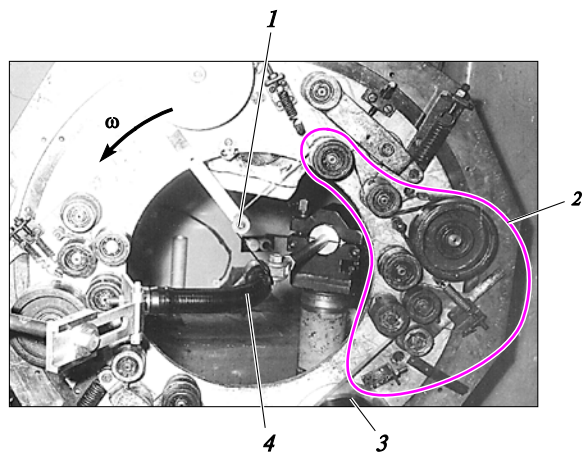
Цель работы — создание модели нового конструкторско-технологического решения формования топливопроводов прямолинейной и криволинейной формы из полимерных пленочных материалов, обеспечивающей необходимый уровень их герметичности при сохранении требуемой несущей способности.

**Конструкторско-технологические особенности полимерных топливопроводов.** Применению полимерных трубопроводов из полиимидного композиционного материала предшествовала большая научно-исследовательская работа [4–6]. В процессе ее выполнения были разработаны конструкции полиимидных трубопроводов, в том числе сложной конфигурации, металлических законцовок для их соединения, технологический процесс изготовления и технологическая оснастка, необходимая для осуществления этого процесса и испытаний трубопроводов, а также изучены основные физико-механические характеристики полиимидного композиционного материала при нормальных и криогенных температурах.

Применение полиимидных пленочных материалов позволило исключить из состава конструкции достаточно громоздкие сильфонные компенсаторы. Полиимидные пленки с фторопластовым покрытием стали основным материалом для изготовления топливопроводов методом многослойной намотки на удаляемую технологическую оправку (рис. 1), изготавливаемую из песчано-клеевой смеси (удаляется вымыванием в проточной воде) либо из тонкостенной трубчатой заготовки из алюминиевого сплава типа АМг-6 (удаляется травлением в растворе NaOH) [7, 8].

Последовательность этапов изготовления пленочных трубопроводов:

- формование удаляемых оправок;
- сборка оправок с соединительными законцовками и установка их на намоточном оборудовании;
- намотка слоев полиимидной пленки;
- термообработка намотанных изделий;
- удаление оправки;
- опрессовка;
- контроль герметичности.



**Рис. 1.** Намотка слоев полиимидной пленки:  
1 — раскладчик; 2 — блок натяжения; 3 — кассета с пленкой;  
4 — наматываемый трубопровод

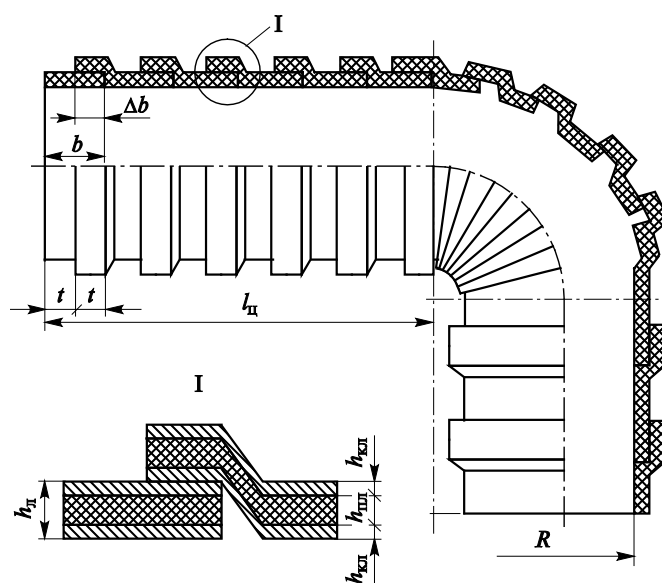
Конструкция внебаковых трубопроводов обязательно предусматривает нанесение наружной теплоизоляции.



**Рис. 2.** Полиимидно-фторопластовые топливопроводы

Полиимидные топливопроводы (рис. 2), представляющие собой оболочки из полимерной полиимидной пленки с двусторонним покрытием фторопласта (ПМФ-352), обладают малой газопроницаемостью, повышенной прочностью, высокой химической стойкостью [9, 10], что обеспечивает им работоспособность при криогенных температурах. Важным фактором, определяющим пригодность полиимидных топливопроводов, является их герметичность по отношению к водороду ввиду его взрывоопасности. Герметичность оболочки полимерного трубопровода определяется как физико-химическими параметрами пленочного материала (проницаемости и диффузии), так и конструктивно-технологическими параметрами наматываемой оболочки.

**Математическая модель топливопровода.** Для изучения влияния физико-химических и геометрических параметров наматываемой пленки была предложена модель многослойной герметизирующей оболочки, изготовленной намоткой узкой полимерной ленты ПМФ-352 с двухсторонним покрытием из модифицированного фторопласта Ф4-МДБ. На жесткую удаляемую оправку наматывают непрерывную пленочную ленту шириной  $b$ , толщиной  $h_{пл}$ , покрытую с обеих сторон клеевым слоем  $h_{кл}$  (рис. 3). Оболочка в общем случае состоит из  $n$  слоев, намотанных с постоянным нахлестом  $\Delta b$ , одинаковым или разным для каждого слоя.



**Рис. 3.** Расчетная схема многослойной пленочной оболочки топливопровода:

$l_{ц}$  — длина цилиндрического участка;  $R$  — радиус поперечного сечения топливопровода;  $t$  — шаг намотки

Рассматриваемая оболочка топливопровода из полимерного пленочного материала является одновременно и герметизирующей и несущей силовую нагрузку.

Предлагаемая математическая модель герметизирующей оболочки предназначена для определения зависимости газопроницаемости от конструкторско-технологических параметров ( $\Delta b$ ,  $b$ ,  $h_{пл}$ ,  $h_{кл}$ ,  $n$ ), позволяющих изготавливать оболочку минимальной массы и требуемой герметичности.

Уровень теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении не позволяет получить модель, соответствующую реальным условиям. Поэтому принимаем следующие допущения:

- рабочее тело — газ, находящийся в трубопроводе при нормальной температуре и при заданном давлении;
- потеря содержимого герметичного трубопровода происходит в результате десорбции газа в режиме проницаемости;
- физико-химические параметры материала оболочки (его коэффициенты проницаемости и диффузии) и газа остаются неизменными в процессе эксплуатации;
- диффузионные потоки десорбируемого газа направлены перпендикулярно поверхности оболочки и независимы друг от друга на прямом и кривом участках;
- утечки через соединения фланца с оболочкой не рассматриваются, торцы трубопровода идеально герметичны.

Очевидно, что физические процессы, протекающие в полимерном материале оболочки при криогенных температурах, отличаются от условий, принятых в допущениях. Предлагаемая модель вполне подходит для расчета герметичности криогенной оболочки, так как при низких температурах уменьшаются коэффициенты диффузии и проницаемости.

Используя основные положения, изложенные в [10], количество вещества, десорбировавшегося за время  $\tau$  с поверхности  $S$  из трубопровода, имеющего проницаемость  $P$  (пропорциональную коэффициенту газопроницаемости и градиенту давления) и коэффициент диффузии  $D$ , может быть определено в следующем виде:

$$Q = \frac{Pn}{\bar{h}} \left[ \tau - \frac{\bar{h}^2}{6D} + \frac{2\bar{h}^2}{\pi^2 D} \exp\left(-\frac{\pi^2 D \tau}{\bar{h}^2}\right) \right] S, \quad (1)$$

где  $\bar{h}$  — средняя толщина стенки оболочки.

Следует отметить, что все слагаемые, стоящие в правой части уравнения (1), имеют размерность времени и связаны с процессами диффузионной релаксации — установлением определенного распределения концентрации по толщине стенки на нестационарном режиме процесса.

Обозначим через  $\theta = \bar{h}^2 / (\pi^2 D)$ , тогда уравнение (1) примет вид

$$Q = \frac{Pn}{\bar{h}} \left[ \tau - \frac{\pi^2}{6} \theta + 2\theta \exp\left(-\frac{\tau}{\theta}\right) \right] S.$$

Из этого уравнения следует, что если  $\tau \gg \theta$ , то основная масса содержимого сосуда десорбируется на стационарной стадии процесса и кинетика процесса определяется значением проницаемости, т. е.

$$Q \cong Pn\tau S (h^{-1}). \quad (2)$$

Если  $\tau \cong \theta$ , при определении  $Q$  следует учитывать и нестационарный участок десорбции, а расчеты производить по формуле (1).

Очевидно, что эти случаи на практике реализуются в зависимости от заданного времени эксплуатации, геометрических размеров трубопровода, коэффициентов диффузии и проницаемости. Для оболочек, наполненных гипотетической газовой средой, с толщиной стенки менее 2 мм, объемом до  $0,1 \text{ м}^3$  и временем эксплуатации  $\tau_{\text{экс}}$  один год можно принять  $\theta = 0,01$ , что много меньше  $\tau_{\text{экс}}$ .

Это означает, что для оболочек данного типа в процессе эксплуатации будет реализовываться первый случай, когда основная потеря среды определяется переносом на стационарной стадии процесса и может быть рассчитана по формуле (2).

Для количественных расчетов конструкции и выбора материала гермослоя необходимо получить аналитическое выражение, связывающее геометрические размеры оболочки, время эксплуатации, дефектность оболочки с характеристиками материала. Под дефектностью оболочки следует понимать разнотолщинность ее стенки и структурную неоднородность материала. Первый тип дефектов в уравнении (2) влияет на величины  $h$  и  $S$ , второй проявляется через значение проницаемости  $P$ . Структурная неоднородность материала пленок, оцененная по плотности различных участков, в сравнении с дефектами геометрических размеров может быть отнесена к величинам второго порядка. Поэтому в дальнейших расчетах основное внимание уделяется лишь дефектам первой группы.

Поток вещества, диффундировавшего через стенку трубопровода при нестационарном режиме до выхода на стационарный режим от  $\tau = 0$  до  $\tau \approx \theta$ , также зависит от ее толщины и, соответственно, количества слоев  $n$ . Данная толщина гарантированно обеспечивает безопасную концентрацию газообразного водорода (как компонента топлива) на внешней поверхности топливопровода в период подачи топлива и работы двигателя.

При определении газопроницаемости комбинированных, многослойных материалов по уравнению (2) воспользуемся соотношением

$$H / P = \sum_{(i=1)}^n \left( \frac{h_i}{p_i} \right), \quad (3)$$

где  $H$  — полная толщина комбинированного материала,  $H = \sum_{i=1}^n h_i$ ;

$P$  — полная проницаемость комбинированного материала;  $h_i, p_i$  — толщина и проницаемость каждого из слоев соответственно;  $n$  — количество слоев.

Уравнение (3) характерно для условий установившегося режима.

Согласно принятым исходным положениям, количество среды, после нестационарного режима десорбировавшейся за время  $\tau$  через оболочку неравномерной толщины, можно представить в виде аддитивной суммы потоков через участки поверхности  $S_i$  с близкими значениями толщин  $h_i$ :

$$Q = \tau P (S_1/h_1 + S_2/h_2 + \dots + S_n/h_n). \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим модель прямолинейного участка топливопровода, выполненного намоткой пленочного материала на цилиндрическую поверхность радиуса  $R$  (рис. 4). Всю длину прямолинейного (цилиндрического) участка  $l_{ц}$  трубопровода можно представить как сумму чередующихся отрезков, отличающихся друг от друга длиной и толщиной. Здесь показана схема укладки узкой ленты шириной  $b$  и толщиной  $h_{л} = h_{пл} + 2h_{кл}$  на цилиндрическую поверхность радиуса  $R$  (см. рис. 3).

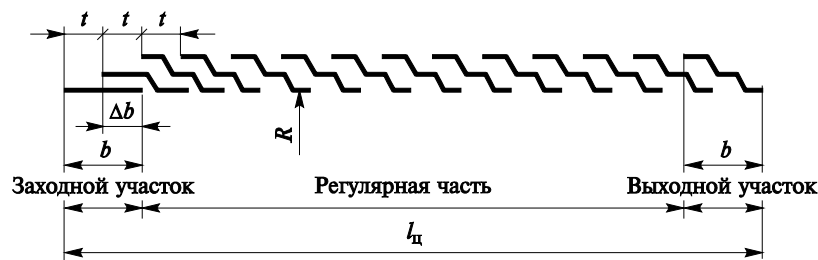


Рис. 4. Схема укладки слоев пленки на цилиндрическом участке трубопровода [11]

Следовательно, формирование структуры материала оболочки будет зависеть от нахлеста  $\Delta b$  или шага намотки  $t = b - \Delta b$ . За один цикл намотки оболочка может быть выполнена однослойной, если  $\Delta b = 0$  ( $t = b$ ), или многослойной, если  $t < b$  ( $\Delta b > 0$ ). В общем случае число слоев находится из равенства

$$m = \frac{b}{b - \Delta b} = \frac{b}{t} = k + \Delta m, \quad (5)$$

где  $k$  — целое число слоев оболочки;  $\Delta m$  — дробная часть слоя.

На рис. 4 можно выделить три характерные зоны оболочки: заходную и выходную длиной  $b$  и регулярную часть трубопровода ( $l_p = l_{ц} - 2b$ ). Первые два участка с изменяющейся толщиной стенки, как правило, доматываются до толщины регулярной части. В противном случае эти участки заделываются в хвостовик законцовки или обрезаются после изготовления оболочки. Поэтому при определении газопроницаемости оболочки рассматривается только ее регулярная

часть, состоящая из чередующихся отрезков длиной, равной шагу намотки  $t$ . Когда шаг намотки кратен ширине ленты  $b$ , оболочка содержит целое число слоев пленки  $k = 1, 2, \dots, n$ , следовательно, толщина ее стенки  $h_{об} = kh_{пл}$  будет постоянной по всей длине трубопровода.

Если число слоев не целое и равно  $m$  (5), то часть оболочки площадью  $S_1$  будет иметь толщину  $h_1 = (k + 1)h_{пл}$ , а толщина другой части (площадью  $S_2$ ) —  $h_2 = kh_{пл}$ .

Выразим  $S_1$  и  $S_2$  через полную площадь оболочки:

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{об} \frac{\Delta t_1}{t} = S_{об} \left( \frac{b - kt}{b - \Delta b} \right) = S_{об} \left( \frac{1}{1 - c} - k \right), \\ S_2 &= S_{об} \frac{\Delta t_2}{t} = S_{об} \left( 1 - \frac{\Delta t_1}{t} \right) = S_{об} \left( 1 + k - \frac{1}{1 - c} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $S_{об} = 2\pi Rl_p$  — площадь оболочки;  $t$  — шаг намотки,  $t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ ;  $c$  — относительный нахлест при намотке,  $c = \Delta b/b$ .

Подставив значения для  $h_1$ ,  $h_2$  и  $S_1$ ,  $S_2$  в (4), получим выражение, определяющее утечку газа на прямолинейном участке трубопровода:

$$Q_{ц} = Pn\tau \left( \frac{S_1}{h_1} + \frac{S_2}{h_2} \right) = Pn\tau \frac{S_{об}}{h_{пл}} \left[ \frac{1}{1 - c} \left( \frac{2 - c}{k + 1} - \frac{c}{k} \right) \right]. \quad (7)$$

Очевидно, что средняя толщина пленочной оболочки

$$h_{ц} = h_{об}^{cp} = mh_{пл} = h_{пл} \frac{1}{1 - c}. \quad (8)$$

Тогда, согласно (2) и (8), среднее значение утечки газа со всей поверхности

$$Q_{ц,ср} = Pn\tau \frac{S_{об}}{h_{пл}} (1 - c). \quad (9)$$

При этом масса оболочки на прямолинейном участке

$$M_{ц} = M_{об} = S_{об} h_{пл} \rho_{л} \left( \frac{1}{1 - c} \right), \quad (10)$$

где  $\rho_{л}$  — плотность материала наматываемой ленты.

**Анализ полученных результатов.** На рис. 5 представлены графические зависимости  $\bar{Q}_{ц} = Q_{ц} / (Pn\tau S_{об} / h_{пл})$  и  $\bar{h}_{об} = h_{об} / h_{пл}$ , построенные по выражениям (7) и (9), где  $\bar{Q}_{ц}$  — относительное количество вещества, десорбировавшегося за время  $\tau$  с поверхности  $S$  цилиндрической части топливопровода,  $\bar{h}_{об}$  — относительная толщина оболочки, выраженная в количестве толщин ленты  $h_{пл}$ .



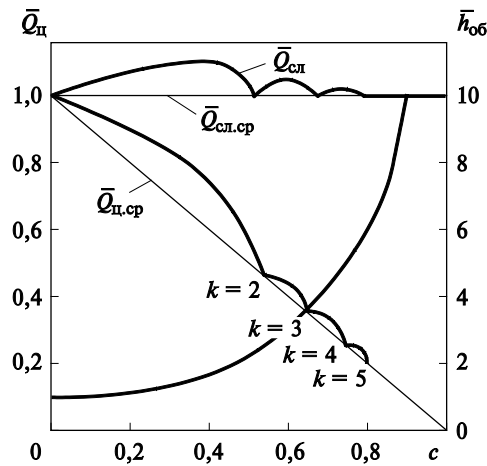


Рис. 5. Зависимости относительной газопроницаемости  $\bar{Q}_c$  и толщины  $\bar{h}_{об}$  от нахлеста  $c$

С увеличением относительного нахлеста  $c$  ( $c = \Delta b/b$ ) от 0 до 1 толщина оболочки, а следовательно, и ее масса неограниченно возрастают, в то же время газопроницаемость через стенку уменьшается. Характерной особенностью многослойной оболочки из полимерной пленки является нелинейная зависимость газопроницаемости  $\bar{Q}_c$  от нахлеста  $c$ . Минимальное значение  $\bar{Q}_c$  достигается в тех случаях, когда шаг намотки кратен ширине наматываемой ленты, т. е. для равнотолщинной оболочки. При других условиях намотки  $\bar{Q}_c > \bar{Q}_{ср}$  и с увеличением нахлеста газопроницаемость  $\bar{Q}_{сл}$ , приведенная к одному слою оболочки, равномерно снижается, приближаясь к  $\bar{Q}_{сл.ср}$  слоя. Максимальное значение  $\bar{Q}_{сл}$  достигается при  $c = 0,33$  и превышает среднее значение газопроницаемости на 12,5 %.

#### Выводы.

1. Представленная модель позволяет оценить основные конструкторско-технологические параметры намотки оболочки топливопроводов, обеспечивающие их требуемый уровень герметичности для газообразных компонентов.

2. Применение полиимидных пленок дает возможность существенно улучшить компоновку топливопроводов в составе криогенного разгонного блока, исключить из их конструкции дорогостоящие и тяжелые компенсаторы перемещений и таким образом снизить массу топливных магистралей на 20...30 % при сохранении пластичности трубопроводов до 20 К.

3. Оболочки из полиимидной пленки обеспечивают герметичность топливопровода по гелию  $5 \cdot 10^{-3}$  л·мкм рт.ст/с ( $\approx 5 \cdot 10^{-7}$  Вт), а также их общую низкую фактическую газопроницаемость.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов А.И., Борисов В.А. Кислородно-водородный ЖРД для разгонных блоков ракет-носителей легкого класса с использованием водородного ТНА, разработанного для авиационного ГТД. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2012, № 3 (34), с. 302–306.
- [2] Двигатель КВД 1. Кислородно-водородный блок 12 КРБ. *Сайт КБХМ*. URL: <http://www.kbhmisaeva.ru/main.php?id=54> (дата обращения 14.10.2019).
- [3] Особенности захлаживания двигательных магистралей разгонных блоков. *КиберПедия*. URL: <https://cyberpedia.su/16xc4b1.html> (дата обращения 16.10.2019).
- [4] Архаров А.М., Кунис И.Д. *Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 252 с.
- [5] Кузнецов В.М., Нехороших Г.Е. Экспериментальные исследования проницаемости газов через стенки оболочек, выполненных из пластиков, армированных пленочными наполнителями. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2013, № 7, с. 53–56.
- [6] Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р. Перспективные пути создания новых термостойких материалов на основе полиимидов. *Труды БГТУ, Химия, технология органических веществ и биотехнология*, 2013, № 4 (160), с. 145–149.
- [7] Нехороших Г.Е. Опыт применения полимерных пленочных материалов в конструкции криогенного разгонного блока «12КРБ». *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*, 2017, т. 18, № 3, с. 318–324.
- [8] Нехороших Г.Е. Технология изготовления заправочных патрубков для сжиженного природного газа из ПКМ. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2013, № 5, с. 15–21.
- [9] Пленка полиимидная ПМФ. *Сайт НПО «Пластик»*. URL: <http://www.proplastic.ru/produkcija/poliimidnye-plenki-laki/plenka-poliimidnaya-pmf.html> (дата обращения 16.10.2019).
- [10] Рейтлингер С.А. *Проницаемость полимерных материалов*. Москва, Химия, 1974, 272 с.
- [11] Комков М.А., Болотин Ю.З., Васильева Т.В. Определение конструктивно-технологических параметров трубопроводов, изготовленных намоткой из полиимидной пленки. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 3. DOI: 10.7463/0313.0541990

Статья поступила в редакцию 22.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Нехороших Г.Е. Определение конструкторско-технологических параметров намотки герметичных топливопроводов из полимерной пленки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-1-1952>

**Нехороших Геннадий Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование и производство изделий из композиционных материалов. e-mail: nekh47@mail.ru

## Determining structural and technological parameters of the polymer films winding process for pipelines

© G.E. Nekhoroshikh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper considers issues related to technology of manufacturing pipelines by winding polymer film materials and assessing their tightness with respect to gaseous and liquid fuel components. The shell is made by winding the required number of layers of continuous film tape with a given width, thickness and overlap on a rigid removable mandrel. The multilayer film structure of the shell made by winding a narrow polymer tape is considered as a computational model of the sealing shell of the pipeline. The tightness of the polymer pipeline shell is determined both by the physical and chemical parameters of the film material (permeability and diffusion coefficients) and by the structural and technological parameters of the wound shell. The simulation results allowed determining the main structural and technological parameters of the winding process as applied to the polyimide-fluoroplastic film PMF-352, which provide the total leakage of the film fuel lines within the requirements.*

**Keywords:** upper-stage rocket, rocket engine, liquid hydrogen, pipeline, polymer film, multilayer winding, tightness, permeability coefficient, diffusion, design model, structural and technological parameters

### REFERENCES

- [1] Ivanov A.I., Borisov V.A. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2012, no. 3 (34), pp. 302–305.
- [2] *Kislородno-vodorodnyy blok* [Oxygen-hydrogen block]. Available at: <http://www.kbhmisaeva.ru/main.php?Id=54> (accessed October 14, 2019).
- [3] *Osobennosti zskholazhivaniya dvigatelnykh magistralei razgonnykh blokov* [Characteristics of cooling upper stage propulsion-system manifold]. Available at: <https://cyberpedia.su/16xc4b1.html> (accessed October 16, 2019).
- [4] Arkharov A.M., Kunis I.D. *Kriogennye zapravochnye komplekсы startovykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic refueling systems of launch rocket and space complexes]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 197 p.
- [5] Kuznetsov V.M., Nekhoroshikh G.E. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik — All the Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2013, no. 7, pp. 53–57.
- [6] Krutko E.T., Prokopchuk N.R. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologii — Proceedings of BSTU. Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology*, 2013, no. 4 (160), pp. 145–149.
- [7] Nekhoroshikh G.E. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov, seriya Inzhenernye issledovaniya — Peoples' Friendship University of Russia Journal of Engineering Researches*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 318–324.
- [8] Nekhoroshikh G.E. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik — All the Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2013, no. 5, pp. 15–21.
- [9] *Plenka poliimidnaya PMF* [Polyimide PMF film]. Available at: <http://www.npoplastic.ru/produkcija/poliimidnye-plenki-laki/> (accessed October 14, 2019).

- [10] Reytinger S.A. *Pronotsaemost polimernykh materialov* [Permeability of polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 269 p.
- [11] Komkov M.A., Bolotin Yu.Z., Vasilyeva T.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of BMSTU*, 2013, no. 3. Available at: [http://www.engjournal.ru/ editorial/](http://www.engjournal.ru/editorial/). DOI: 10.7463/0313.0541990

**Nekhoroshikh G.E.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: design and manufacture of products from composite materials.  
e-mail: nekhor47ge@mail.ru