



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13

УДК 678.01

Экспериментальные исследования работоспособности теплозащитного слоя композитных трубопроводов при захолаживании жидким водородом

Г.Е. Нехороших*

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2018

Доработана: 19 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

криогенное топливо;
теплоизолирующее покрытие;
жидкий водород;
циклическое захолаживание и отогрев;
технологический процесс;
оснастка

Целью работы является создание нового конструкторско-технологического решения, обеспечивающего работоспособность теплоизолирующих покрытий в условиях многоциклового теплового нагружения. В связи с перспективой применения криогенных топлив в авиационной (многоразовой) технике обеспечение работоспособности теплоизолирующих покрытий в таких условиях является актуальным. Для разработанной технологии проводилось экспериментальное определение основных параметров теплоизолирующих покрытий. В качестве объектов исследований использовались композитные трубопроводы криволинейной и прямолинейной формы. Конструкция трубопровода включала в себя герметизирующую пленочную оболочку, силовую оболочку из полимерного композиционного материала, пенопластовое теплоизолирующее покрытие и металлические присоединительные фланцы. На модельных композитных образцах криогенных трубопроводов проведены циклические испытания на захолаживание жидким водородом (заполнение топливных магистралей) и отогрев до температуры окружающей среды (слив компонентов). В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа. Затем на один час во внутреннюю полость производилась заливка жидкого водорода, после чего в течение часа производился естественный отогрев до нормальной температуры. Полученные результаты позволили определить зависимость температуры и теплового потока оболочки с теплоизолирующих покрытий от количества циклов захолаживания, предложить конструкторско-технологическое решение для существенного уменьшения криоподсоса при больших перепадах температур в теплоизолирующих покрытиях, показать эффективность применения при циклическом захолаживании заливочных пенопластов с закрытой пористостью типа «Викорт-3М».

Введение

Разработка технологии применения для авиационных и ракетных двигателей более эффективных и экологически чистых криогенных топлив в виде

сжиженных газов — водорода (винил), кислорода (оксид), природного газа (метан) — потребовала создания трубопроводных магистралей из современных композиционных материалов, а также новых теплоизолирующих покрытий (ТИП), обеспе-

* Доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции», к.т.н., доцент; nekh0r47ge@mail.ru

© Нехороших Г.Е., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

чивающих надежную защиту этих магистралей от внешних теплопритоков.

Свойство газов существовать в жидком состоянии при очень низких температурах: водород (23 К), кислород (86 К), воздух (81 К), метан (111 К) требует эффективной тепловой защиты, особенно если магистрали располагаются вне баков, содержащих соответствующий сжиженный газ.

Топливные магистрали двигателей летательных аппаратов многоразового использования нуждаются в надежном ТИП, т.к. при их эксплуатации необходимо многоцикловое захлаживание при заливке криогенного топлива в трубопроводы и отогрев при его сливе. Широко используемые в настоящее время теплоизолирующие покрытия в виде пенополиуретанов (ППУ), наносимых на поверхность защищаемого изделия методом напыления или заливкой смеси из составляющих компонентов, оказались непригодными для криогенных трубопроводов из-за изменения их теплозащитных свойств в процессе циклического захлаживания.

В связи с этим поиск новых конструкторско-технологических решений, обеспечивающих работоспособность ТИП в условиях многоциклового теплового нагружения, является актуальной задачей.

Экспериментальные исследования влияния на работоспособность композитных трубопроводов циклических захлаживаний до температуры жидкого водорода 23 К и последующего отогрева до температуры окружающей среды 293 К были проведены на стендах организации НИИХИММАШ (ФКП «НИЦ РКП»). В качестве объектов исследований использовались композитные трубопроводы внутренним диаметром 50 мм криволинейной и прямолинейной форм, изготовленные в МГТУ имени Н.Э. Баумана, с ТИП, разработанным и нанесенным НПО «Полимерсинтез» [5; 9; 12]. Конструкция трубопровода включала в себя герметизирующую пленочную оболочку, силовую оболочку из полимерного композиционного материала, пенопластовое теплоизолирующее покрытие и металлические присоединительные фланцы. На модельных композитных образцах криогенных трубопроводов проведены циклические испытания на захлаживание жидким водородом (23 К) (заполнение топливных магистралей) и отогрев до температуры окружающей среды (слив компонентов). В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа при температуре от 50 до 80 К. Затем на один час во внутреннюю полость произ-

водилась заливка жидкого водорода с температурой 23 К, после чего в течение часа производился естественный отогрев до температуры 293 К.

1. Обоснование выбора конструкторского решения.

Конструкция криволинейного трубопровода приведена на рис. 1.

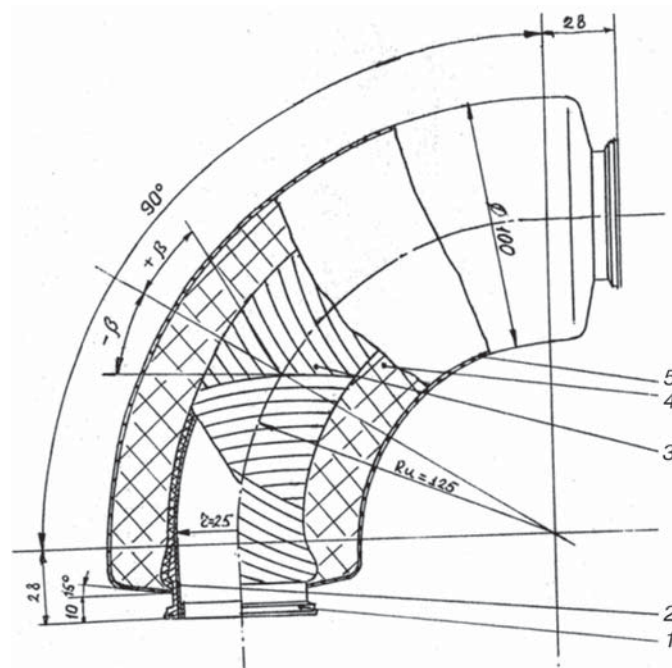


Рис. 1. Криволинейный криогенный композитный трубопровод: 1 — металлическая законцовка; 2 — пленочная герметизирующая несущая оболочка; 3 — намотанная композитная силовая оболочка; 4 — теплозащитное покрытие; 5 — внешний герметизирующий силовой слой

[Figure 1. Curved cryogenic composite pipeline:

1 — metal tip; 2 — film sealing carrier shell; 3 — coiled composite power jacket; 4 — heat protection coating; 5 — external sealing force layer]

Известно, что ППУ покрытия получают с открытой или закрытой пористостью. Первые испытания модельных трубопроводов с ТИП из напыленного пенополиуретана ППУИ-1, имеющего открытую пористость, выявили способность этого покрытия к быстрому растрескиванию (после 6 циклов) и фактическому разрушению.

Испытатели объясняют это так называемым криоподсосом, наблюдающимся при захлаживании и последующем отогреве. Дело в том, что компоненты воздуха (главным образом азот, кислород, углекислый газ), находящиеся в открытых порах напыленного пенополиуретана типа ППУИ-1, при захлаживании до температуры жидкого водорода 23 К переходят в жидкое и отвержденное состояния,

занимая значительно меньший объем, в который засасываются новые порции воздуха из окружающей среды. При сливе из трубопровода жидкого водорода происходит очень быстрый отогрев до 293 К, приводящий к резкому расширению в порах покрытия находящегося в них газа и, как следствие, повышению давления внутри теплозащитного слоя, растрескиванию и его последующему разрушению.

Наиболее существенно этот недостаток проявляется в пенопластах с открытой пористостью. Немалую роль в растрескивании ТИП играет значительная разница в величине коэффициентов термического расширения материалов герметизирующей, силовой и теплозащитной оболочек криогенного трубопровода.

В связи с этим для покрытия использовался пенопласт с закрытой пористостью, а с целью уменьшения криоподсоса на наружную поверхность теплоизолированного трубопровода приклеивался дополнительный слой герметичной полиэтилен-рефталатной пленки.

По рекомендации специалистов НПО «Полимерсинтез» был выбран пенопласт «Викорт-3М» [12] на основе поликарбодиимида, получаемый методом заливки смеси из составляющих данное покрытие компонентов на изделие, помещенное в пресс-форму, обеспечивающую расчетную толщину наносимого теплоизолирующего покрытия. Песформы для криволинейного и прямолинейного трубопроводов представлены на рис. 2 и 3.

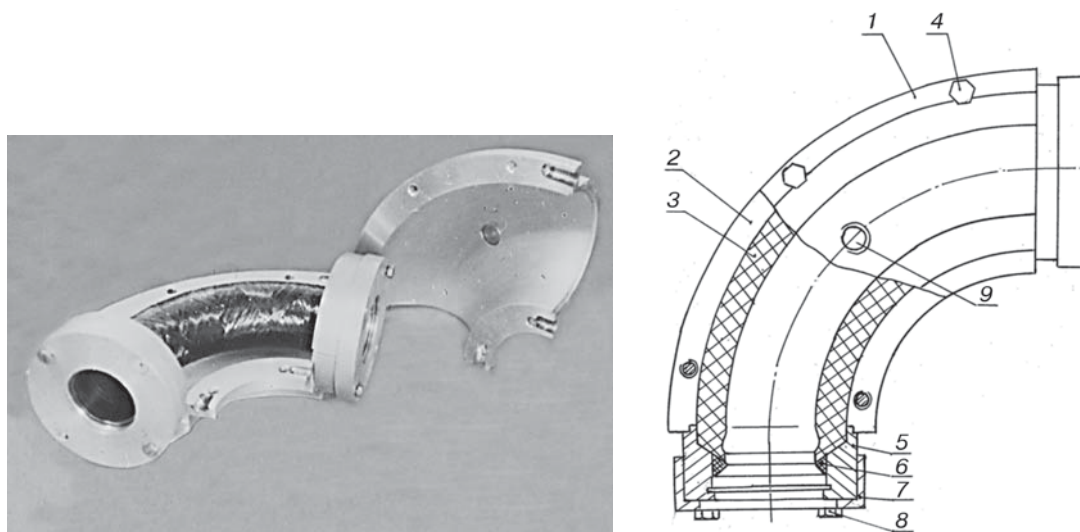


Рис. 2. Пресс-форма для заливки ТИП на криволинейный трубопровод:

1, 2 — верхняя и нижняя полуформы; 3 — залитое покрытие; 4 — стягивающие болты; 5 — торцевые втулки; 6 — уплотнительное кольцо; 7 — торцевые крышки; 8 — болты крепления крышек; 9 — заправочное отверстие

[Figure 2. Mold for casting thermal insulation coating on a curved pipeline:

1, 2 — upper and lower half-forms; 3 — flooded coating; 4 — tightening bolts; 5 — end bushings; 6 — a sealing ring; 7 — end caps; 8 — cover bolts; 9 — filling hole]

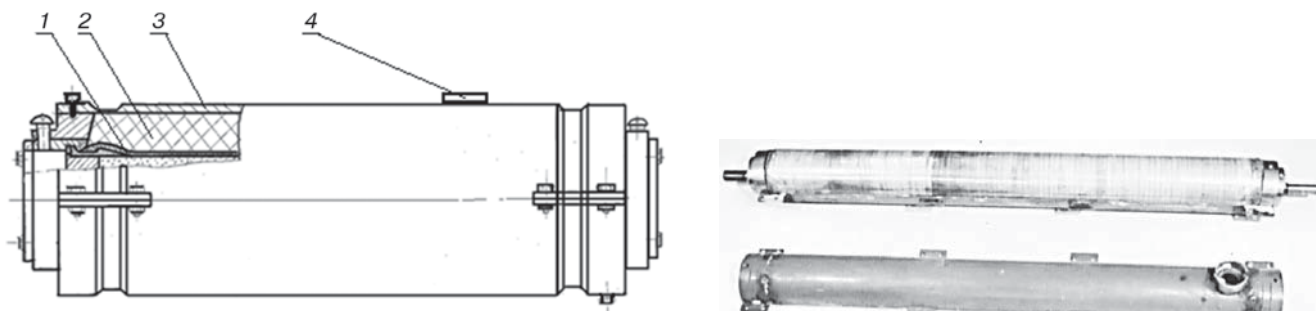


Рис. 3. Пресс-форма для заливки ТИП на прямолинейный трубопровод:

1 — силовая оболочка; 2 — теплоизолирующее покрытие; 3 — пресс-форма; 4 — штуцер для заливки смеси

[Figure 3. Mold to fill the thermal insulation coating of straight pipe:

1 — power shell; 2 — thermal insulation coating; 3 — mold; 4 — fitting for pouring the mixture]

Важнейшие физико-механические свойства ТИП «Викорт-3М» приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические характеристики ТИП на основе пенопласта «Викорт-3М»

| Показатель | Норма кажущейся плотности, кг/м ³ | |
|---|--|-----------|
| | 250—350 | 350—500 |
| Разрушающее напряжение, МПа (не менее) | 5—10 | 10—12 |
| Ударная вязкость, кДж/м ² (не менее) | 1,0 | 1,5 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,05—0,09 | 0,05—0,09 |
| Горючесть по ГОСТ 12.1.044 | Трудногоряемый | |
| Кислородный индекс, % (не менее) | 33 | 33 |
| Изменение размеров при 200 °С за 24 ч, % (не более) | 1,0 | 0,5 |

Table

Physicomechanical characteristics of thermal insulation coating on the basis of “Vikort-3M” polyfoam

| Indicator | The rate of apparent density, kg/m ³ | |
|--|---|-----------|
| | 250—350 | 350—500 |
| Destructive stress, MPa (not less) | 5—10 | 10—12 |
| Impact strength, kJ/m ² (at least) | 1.0 | 1.5 |
| Heat conductivity coefficient, W/(m·K) | 0.05—0.09 | 0.05—0.09 |
| Flammability in accordance with GOST 12.1.044 | Трудногоряемый | |
| Oxygen index, % (not less) | 33 | 33 |
| Size change at 200 °C in 24 hours, % (not more than) | 1.0 | 0.5 |

2. Последовательность технологических операций формования ТИП

Собранная и подготовленная к заливке пресс-форма вместе с образцом трубопровода помещалась в термошкаф и подогревалась перед заливкой до температуры 370—380 К. Приготовление заливочной смеси и заливка проводились в лабораторных условиях. Составляющие компоненты отвешивались на электронных весах с точностью до 0,1 г и перемешивались с помощью электрической мешалки в течение 20 сек. Готовая смесь вводилась в пресс-форму через заливочное отверстие. Время заливки составляло 15 сек. После этого заливочное отверстие быстро закрывалось пробкой, и около 15—20 минут пресс-форма находилась в неподвижном состоянии при комнатной температуре и нормальном давлении. За это время смесь вспенивалась. Затем пресс-форма помещалась в термошкаф, в котором выдерживалась при температуре от 370 до 380 К в течение 2—3 часов для придания тепло-

изолирующему покрытию необходимых физико-механических и теплофизических свойств. Расчет навесок компонентов проводился исходя из величины внутреннего объема пресс-формы и заданной величины плотности ТИП.

Следует отметить, что при подобном нанесении ТИП на трубопроводы в процессе вспенивания пенополиуретана происходит повышение давления внутри замкнутого объема пресс-формы и на цилиндрическую поверхность изделия начинают действовать усилия всестороннего сжатия. Чтобы покрываемая оболочка не потеряла свою форму из-за потери устойчивости, необходимо внутреннюю технологическую оправку, на которой осуществлялось формование данной многослойной оболочки, удалять из изделия после окончания процесса нанесения теплоизолирующего покрытия.

3. Анализ результатов эксперимента

Для проверки работоспособности теплоизолирующего покрытия производилось циклическое захлаживание внутренней полости трубопроводов жидким водородом с замером температуры и величины теплового потока на внешней поверхности теплоизоляции.

В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа при температуре 50—80 К. Затем на один час во внутреннюю полость производилась заливка жидкого водорода с температурой 23 К, после чего в течение часа производился естественный отогрев до температуры 293 К.

Существенно более эффективным при термоциклировании оказалось покрытие из пенопласта «Викорт-3М». После 30 циклов захлаживания жидким водородом резко выраженных эффектов, свидетельствующих о разрушении теплоизолирующего покрытия, не наблюдалось.

Однако несмотря на отсутствие признаков нарушения целостности пенопластового покрытия на уровне макродефектов, регистрируемых отклонениями показаний температурных датчиков, по мере увеличения количества циклов захлаживания отмечается некоторое ухудшение его теплоизолирующих свойств, особенно после 14-го цикла. Эта особенность иллюстрируется графиком на рис. 4, где представлены величины теплопритока Q и температуры T наружной стенки испытываемого трубопровода в зависимости от количества проведенных термоциклов.

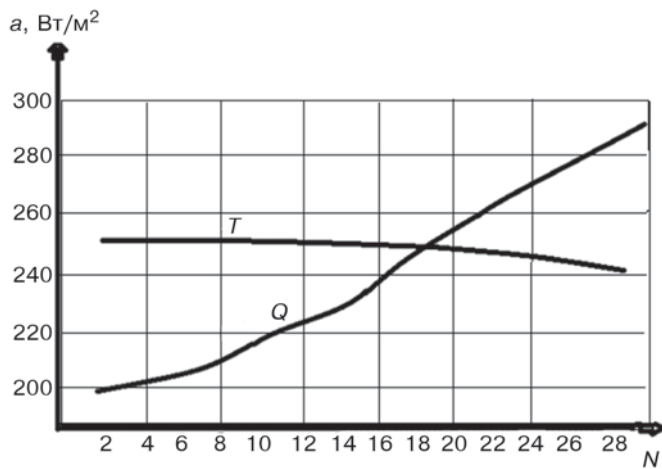


Рис. 4. Зависимость температуры и теплового потока оболочки с ТИП «Викорт-3М» от количества циклов захлаживания [Figure 4. Dependence of temperature and heat flux of the shell with the thermal insulation coating “Vikort-3M” on the number of cooling cycles]

Выводы

По результатам выполненных экспериментальных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. С целью уменьшения теплопритоков из внешней среды к поверхности криогенных трубопроводов предпочтительнее использовать заливочные пенопласты с закрытой пористостью типа «Викорт-3М».

2. Для существенного уменьшения явления криоподсоса при резком изменении перепада температуры теплоизолирующего покрытия у криогенных трубопроводов при заправке и заливке топлива типа жидкого водорода следует тщательно герметизировать внешнюю поверхность ТИП.

3. Внутреннюю технологическую оправку, используемую для формования композитного криогенного трубопровода, следует удалять из его полости только после окончания процесса нанесения теплоизолирующего слоя.

Список литературы

[1] Вспененные пластические массы: каталог / под ред. В.В. Салия. Черкассы, 1988.

- [2] *Вигли Д.А.* Механические свойства материалов при низких температурах. М.: Мир, 1974. 376 с.
- [3] Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков / под ред. М.П. Малкова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
- [4] *Кузнецов В.М., Нехороших Г.Е.* Экспериментальные исследования проницаемости газов через стенки оболочек, выполненных из пластиков, армированных пленочными наполнителями // Все материалы: энциклопедический справочник с приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2013. № 7. С. 53–57.
- [5] *Нехороших Г.Е.* Опыт применения полимерных пленочных материалов в конструкции криогенного разгонного блока «12КРБ» // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 318–324.
- [6] Установки и системы криогенной техники: сборник научных трудов / под ред. В.И. Сухова. Балашиха: НПО «Криогенмаш», 1989. 146 с.
- [7] *Архаров А.М., Кунис И.Д.* Криогенные заправочные комплексы стартовых ракетно-космических комплексов / под ред. И.В. Бармина. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. 197 с.
- [8] Röchling Group. URL: roechling.com/industrial/characteristics/cryogenic-insulation-materials
- [9] *Нехороших Г.Е.* Технология изготовления заправочных патрубков для сжиженного природного газа из ПКМ // Все материалы: энциклопедический справочник. 2013. № 5. С. 15–21.
- [10] *Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р.* Перспективные пути создания новых термостойких материалов на основе полиимидов // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнологии. 2013. № 4. С. 145–149.
- [11] *Бейдер Э.Я., Гуреева Е.В., Петрова Г.Н.* Пенополиимиды // Все материалы: энциклопедический справочник. 2012. № 6. С. 2–8.
- [12] ТУ 6-55-221-934-89. Компонент А1-викорт-3М. 1989. 8 с.

Для цитирования:

Нехороших Г.Е. Экспериментальные исследования работоспособности теплозащитного слоя композитных трубопроводов при захлаживании жидким водородом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 7–13. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13

Experimental studies of the performance of the heat-shielding layer of composite pipelines during cooling with liquid hydrogen

Gennady E. Nekhoroshikh*

N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), 5 2nd Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Article history:

Received: December, 12 2018

Revised: January 19, 2019

Accepted: January 30, 2019

Keywords:

cryogenic fuel;
thermal insulation coating;
liquid hydrogen;
cyclic cooling and heating;
technological process;
equipment

The development of technology for aircraft and rocket engines more efficient and environmentally friendly cryogenic fuels in the form of liquefied gases: hydrogen (vinyl), oxygen (oxide), natural gas (methane), required the creation of pipelines from modern composite materials, as well as new thermal insulation coatings (TIC), providing reliable protection of these highways from external heat leakage. Fuel out-of-flight manifolds of reusable aircraft require a particularly reliable TIC, since during the operation of the product, their multi-cycle cooling down occurs when pouring cryogenic fuel into the pipelines and heating at the discharge. Thermally insulating coatings in the form of polyurethane foam (PUF), applied to the surface of the protected product, by spraying or pouring a mixture of the constituent components, which are widely used at the present time, are not fully suitable for cryogenic pipelines due to the deterioration of their heat insulating properties in the process of cyclic cooling. The aim of the work is to create a new design and technological solution that ensures the performance of the TIC in the conditions of high-cycle thermal loading. In connection with the prospect of using cryogenic fuels in an aviation (reusable) technology, ensuring the performance of a TIC in such conditions is relevant. For the developed technology, experimental determination of the main parameters of the TIC was carried out. Composite pipelines of curvilinear and rectilinear shape were used as objects of research. The pipeline design included a sealing film sheath, a power sheath made of a polymer composite material, a foam heat insulating coating and metal connecting flanges. On model composite samples of cryogenic pipelines, cyclic tests for cooling with liquid hydrogen (filling of fuel lines) and heating to ambient temperature (draining components) were carried out. During the tests, the pipeline was first cooled with hydrogen gas for one hour. Then, for one hour, liquid hydrogen was poured into the internal cavity, after which natural warming up to a normal temperature was carried out for an hour.

The obtained results allowed to determine the dependence of temperature and heat flow of the shell with TIC on the number of cooling cycles, to propose a design and technological solution for a significant reduction of the cryopump at large temperature differences in the TIC, to show the effectiveness of cyclic cooling of foam porosity with closed porosity of the “Vikort-3M”

References

- [1] Saliy V. (ed.). *Vspenennye plasticheskie massy [Foamed plastics: catalog]*. Cherkasy; 1988. (In Russ.)
- [2] Wigley DA. *Mekhanicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturahs [Mechanical properties of materials at low temperatures]*. Moscow: Mir Publ.; 1974. (In Russ.)
- [3] Malkov MP, Danilov IB, Zeldovich AG, Fradkov AB. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki [Handbook on the physico-technical basics of cryogenics]*. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1985. (In Russ.)
- [4] Kuznetsov VM, Nekhoroshikh GE. Eksperimental'nye issledovaniya pronicaemosti gazov cherez stenki obolochek, vpolnennyh iz plastikov, armirovannyh plenochnymi napolnityami [Experimental studies of the permeability of gases through the walls of shells made of plastics reinforced with film fillers]. *Vse materialy: entsiklopedicheskii spravochnik s prilozheniem “Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam” [All materials: encyclopedic reference book with the appendix “Comments on standards, specifications, certificates”]*. 2013;(7): 53—57. (In Russ.)
- [5] Nekhoroshikh GE. Opyt primeneniya polimernykh plynochnykh materialov v konstrukcii kriogenogo razgonnogo bloka “12KRB” [Experience in the use of polymeric film materials in the construction of a cryogenic upper stage “12KRB”]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 318—324. (In Russ.)

* Associate Professor of the Rocket and Space Composite Structures Department, Candidate of Technical Sciences; nekhor47ge@mail.ru

- [6] *Ustanovki i sistemy kriogennoj tekhniki: sbornik nauchnyh trudov* [Cryogenic equipment installations and systems: collection of scientific papers]. Sukhova VI (ed.). Balashikha: NGO “Cryogenmash” Publ.; 1989. (In Russ.)
- [7] Arkharov AM, Kunis ID. *Kriogennye zapravochnye komplekсы startovyh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic filling complexes of launch rocket-space complexes]. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 2006. (In Russ.)
- [8] Röchling Group. URL: roechling.com/industrial/characteristics/cryogenic-insulation-materials
- [9] Nekhoroshikh GE. Tekhnologiya izgotovleniya zapravochnyh trubkov dlya szhizhennogo prirodnogo gaza iz PKM [Manufacturing technology of filling pipes for liquefied natural gas from PKM]. *Vse materialy: enciklopedicheskij spravochnik* [All materials: encyclopedic reference]. 2013;(5): 15–21. (In Russ.)
- [10] Krutko ET, Prokopchuk NP. Perspektivnye puti sozdaniya novyh termostojkih materialov na osnove poliimidov [Perspective ways of creating new heat-resistant materials based on polyimides]. *Trudy BGTU. Himiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologii* [Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology]. 2013;(4): 145–149. (In Russ.)
- [11] Beyder EYa, Gureeva EV, Petrova GN. Penopoliimidy [Penopoliimidy]. *Vse materialy: enciklopedicheskij spravochnik* [All materials: encyclopedic reference]. 2012;(6): 2–8. (In Russ.)
- [12] *TU 6-55-221-934-89. Component A1-Vikort-3M*. 1989. (In Russ.)

For citation:

Nekhoroshikh GE. Experimental studies of the performance of the heat-shielding layer of composite pipelines during cooling with liquid hydrogen. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 7–13. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13 (In Russ.)