

Оптимизация угла намотки углепластика на металлический лейнер криогенного трубопровода

© М.А. Комков, Д.А. Потапов, А.А. Кудрявцев

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

Показана актуальность создания криогенных трубопроводов двигательных установок летательных аппаратов из комбинированных материалов на основе ультратонкого стального лейнера и намотанного углепластика. Проведен анализ захлаживания трубопровода до криогенных температур, при которых вследствие существенного различия коэффициентов линейного термического расширения материалов лейнера и углепластика возможна потеря осевой устойчивости с образованием радиальных складок в тонкостенной стальной оболочке. Предложена методика определения и выбора угла намотки углепластика, при котором осевые деформации тонкостенного лейнера и намотанного композита будут иметь одинаковый уровень деформаций.

Ключевые слова: *трубопровод, комбинированная оболочка, криогенная температура, коэффициент линейного расширения*

Введение. Ужесточение требований к рабочим параметрам двигательных установок изделий ракетно-космической техники (РКТ), авиации и наземного транспорта на криогенных топливах (жидком кислороде и водороде или метане CH_4 в качестве горючего [1–5]), привело к созданию легких, прочных и герметичных трубопроводов, работающих в многоцикловом режиме при высоких давлениях, нормальных, повышенных и криогенных температурах.

Трубопроводы, выполненные из металлов, имеют излишне большую массу и изгибную жесткость. Для снижения массы и уровня монтажных сил предложено использовать рассматриваемые в настоящей работе криогенные трубопроводы, которые изготавливают из тонкой металлической оболочки (лейнера), усиленной композиционным материалом (углепластиком) методом спиральной намотки.

При захлаживании комбинированного трубопровода до криогенных температур в его слоях будут возникать температурные деформации, зависящие от значений коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) материалов слоев. При этом в слое углепластика, намотанного под углами $\beta > 55^\circ$ к оси изделия, и в зависимости от толщины слоя намотки могут возникнуть значительные сжимающие напряжения, которые приведут к потере осевой устойчивости тонкостенной металлической оболочки с образованием радиальных гофр в области фланца [6–7]. При многоцикловом захла-

живании трубопровода до криогенных температур и нагружении его внутренним давлением на поверхности гофр со временем могут возникнуть микротрещины, что приведет к потере герметичности изделия.

Таким образом, цель настоящей работы — для обеспечения работоспособности и снижения массы комбинированного трубопровода определить оптимальные углы намотки углепластиковой оболочки, при которых осевые деформации тонкостенного лайнера и намотанного композита при захлаживании до криогенных температур имеют одинаковый уровень осевых перемещений.

Технологическое проектирование. Как правило, в комбинированном трубопроводе (рис. 1, а) тонкостенная металлическая оболочка-лейнер 1 жестко соединена с фланцами 2 аргонодуговой сваркой, а сверху по спирали (рис. 1, б) на оболочку и фланцы намотан однонаправленный композиционный материал 3. На рис. 1 показана конструктивная схема криогенного трубопровода, соединение стальной (X18H10T) оболочки с фланцем торцевой сваркой, а также петлевое соединение намотанного углепластика (УКН-5000 + ЭДТ-10) с коническим хвостовиком фланца. Трубопроводы собираются между собой с помощью центрирующего кольца 4 и соединяются сваркой по схеме «колокольчик».

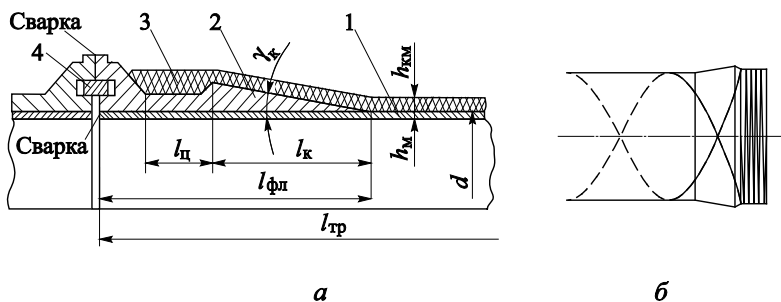


Рис. 1. Конструктивно-технологическое оформление стыковочного узла трубопровода (а) и схема намотки нитей (б):
1 — лайнер; 2 — фланец; 3 — оболочка углепластиковая; 4 — кольцо центрирующее

Для того чтобы внутренний диаметр трубопровода оставался постоянным по всей длине, намотку композитного слоя осуществляют на расширяющийся конический выступ (бурт) хвостовика фланца с углом охвата наматываемой ленты бурта фланца на 180° или 360° . В связи с этим для сборки и соединения композитных трубопроводов малых диаметров применяют законцовки типа «вмотанный фланец» [8, 9]. В общем случае угол β спиральной намотки углепластика на лайнер (рис. 2) должен быть больше $54,7^\circ$. Однако при этом

становится неясным выбор значения угла намотки $\pm\beta$ в случае захлаживания трубопровода до криогенной температуры. Проблема заключается в том, что вследствие существенного различия КЛТР металлического лайнера и намотанного углепластика (рис. 3, [10, 11]) их осевые и радиальные деформации при захлаживании до криогенных температур будут неодинаковыми, что может привести к потере осевой устойчивости тонкостенной стальной оболочки.

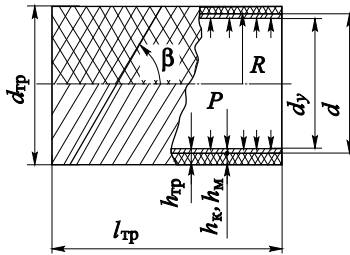


Рис. 2. Конструктивная схема трубы из комбинированных материалов

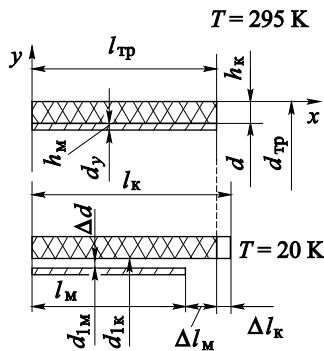


Рис. 3. Схема изменения длины лайнера Δl_m , углепластиковой оболочки Δl_k и их диаметров Δd при захлаживании трубопровода до криогенных температур

Действительно, при захлаживании от температуры 295 до 20 К вследствие различия значений КЛТР произойдет неодинаковое изменение длины и диаметра металлического лайнера и углепластиковой оболочки в их свободном состоянии (см. рис. 2). Очевидно, что в результате захлаживания в материалах комбинированной оболочки возникнут температурные деформации ϵ_α , определяемые интегралом

$$\epsilon_\alpha(T, \beta) = \int_{T=20\text{ К}}^{T=295\text{ К}} \alpha(T, \beta) dT = \frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

где $\alpha(T, \beta)$ — экспериментальные зависимости КЛТР материалов; Δl — изменение длины (диаметра Δd) металлического лейнера или слоя углепластика в зависимости от температуры и углов намотки $\pm\beta$.

В результате интегрирования графических зависимостей (рис. 4, [12]) получено изменение относительных деформаций (рис. 5) при захолаживании трубопровода от температуры 295 до 20 К и диапазоне углов намотки углепластика $\beta = 0 \dots 90^\circ$.

Если лейнер не склеен (разделен) с углепластиковой оболочкой, то при больших углах намотки β_x и, следовательно, малых углах $\beta_y = 90^\circ - \beta$ (радиальное направление) между ними образуется зазор (см. рис. 2), а при углах намотки больше $\beta \leq 45^\circ$ тонкостенный лейнер будет сжат более толстой углепластиковой оболочкой в радиальном направлении и может потерять устойчивость в окружном направлении. Таким же образом изменяется и их длина. Однако в осевом направлении композитная оболочка и лейнер жестко скреплены (соединены) между собой на хвостовиках фланцев трубопровода. Следовательно, в зависимости от углов армирования углепластиковой оболочки лейнер при захолаживании может испытывать как сильное растяжение, так и сильное сжатие. Например, при углах намотки $\beta = 30^\circ$ тонкостенный лейнер будет сильно растянут (см. рис. 5), а когда углы намотки $\beta \geq 90^\circ$, то сильно сжат и потеряет осевую устойчивость с образованием кольцевых складок.

В то же время из данных на рис. 6 следует, что при углах намотки $\beta = \pm 67,5^\circ$ осевые линейные деформации лейнера и углепластиковой оболочкой равны друг другу. Принимая угол намотки равным $\beta = \pm 67,5^\circ$, уравниваем тем самым осевые температурные деформации разнородных слоев и исключаем осевую потерю устойчивости лейнера с образованием кольцевых складок при циклическом захолаживании трубопровода и нагружении его внутренним давлением. Однако радиальные деформации слоев при угле намотки углепластика $\beta_y = 22,5^\circ$ (радиальное направление) значительно отличаются друг от друга. Так, диаметр лейнера $\Delta d_{\text{лм}}$ уменьшается на $-0,296\%$, а диаметр углепластиковой оболочки $\Delta d_{\text{лк}}$ увеличивается на $+0,05\%$. При этом образуется суммарный зазор между слоями, определяемый как

$$\Delta d = 2\Delta R = \Delta d_{\text{лк}} - \Delta d_{\text{лм}} = \varepsilon_d d,$$

где d — диаметр лейнера; $\varepsilon_d = [0,05\% - (-0,296\%)] = 0,346\%$ — суммарная деформация по диаметру. При этом деформация по радиусу составит $\varepsilon_{\text{рад}} = 0,173\%$.

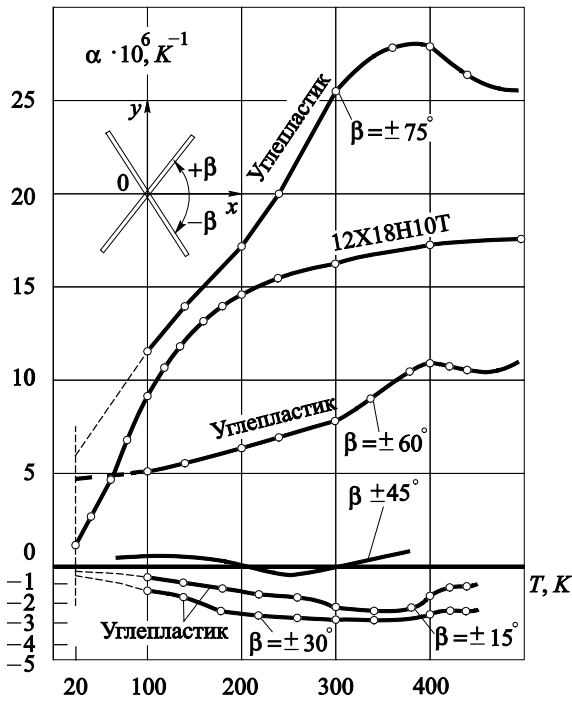


Рис. 4. Зависимости коэффициента линейного температурного расширения $\alpha = f(T, \pm \beta)$ в направлении оси Ox трубопровода для эпоксидного углепластика на основе волокна УКН-5000

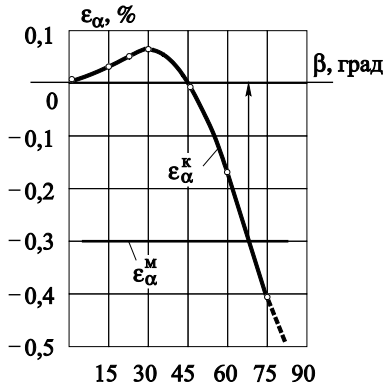


Рис. 5. Зависимость температурных деформаций лейнера ϵ_{α}^M и оболочки ϵ_{α}^K от углов армирования β при захлаживании до $T = 20 \text{ K}$

Эксперименты и обсуждение результатов. Опытные цилиндрические образцы трубопроводов диаметром $d_{\text{тр}} = 50$ мм и длиной 295 мм с толщиной металлического лайнера $h_{\text{м}} = 0,3$ мм, сваренного АДС вдоль оси трубы, и углепластикового слоя толщиной $h_{\text{к}} = 0,52$ мм, намотанного под углом $67,5^\circ$, прошли испытание внутренним давлением жидкости. Разрушение образцов водой при нормальной температуре произошло при давлении $p = 13,0$ МПа, а разрушение жидким азотом ($T \approx -186$ °С) — при $p = 15,8$ МПа. Лайнер разрушился вдоль продольного шва, а углепластиковая оболочка полностью отошла от лайнера. Испытания на термоциклирование (захолаживание — отогрев) показали, что образования складок и гофров на тонкостенной металлической оболочке не происходит.

В конечном случае спроектированный криогенный трубопровод будет заполняться жидким водородом (кислородом, метаном) и нагружаться рабочим давлением p с учетом гидроудара. При этом необходимо, чтобы деформации металла под рабочим давлением не превышали его упругие деформации, т. е. $\epsilon_{\text{м}} \leq \epsilon_{\text{упр}}$, а при разрушающем давлении $\epsilon_{\text{м}} \leq \epsilon_{\text{т}}$. Известно [10, 11], что при низких и криогенных температурах металлы становятся менее пластичными, но более прочными (табл. 1), при этом модуль упругости стали увеличивается незначительно.

Таблица 1

Характеристика хромоникелевой стали 12Х18Н10Т-ВД по ТУ14-1-3581-83 (листы закаленные, $h = 1,5$ мм)

Температура, °С	Модуль упругости E , ГПа	Напряжение, МПа			Деформация, %	
		$\sigma_{\text{т}}$	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{св. шва}}$	δ	ψ
20	188	280	660	660	65	—
-196	—	550	1540	1470	36	—
-253	—	710	1850	—	37	—

Упругая деформация стали 12Х18Н10Т-ВД при температуре жидкого азота (-196 °С) составит $\epsilon_{\text{упр}} = \sigma_{\text{т}}/E_{\text{м}} = 550/188 = 0,293$ %, а деформация при пределе текучести $\epsilon_{\text{т}} = \epsilon_{\text{упр}} + \epsilon_{0,2} = 0,493$ %. В этом случае расчетная реализуемая прочность однонаправленного углепластика в зоне упругости металла $\overline{\sigma_{\text{к, упр}}} = \epsilon_{\text{упр}} E_{\text{к}} = 369$ МПа, а при деформации предела текучести металла $\overline{\sigma_{\text{к, т}}} = \epsilon_{\text{т}} E_{\text{к}} = 621$ МПа, где $E_{\text{к}} = 126$ ГПа (табл. 2).

Характеристики углепластика на основе нити УКН-5000 и связующего ЭХД-МК

Характеристика	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Плотность углепластика	ρ_k	кг/м ³	1580
Модуль упругости вдоль волокон	E_k	ГПа	126
Коэффициент Пуассона	ν_{12}	—	0,192
Предел прочности вдоль волокон	σ_k	МПа	1270

Однако и значение $\overline{\sigma_{k,T}} = 621$ МПа, которое значительно меньше предела прочности углепластика (см. табл. 2), в радиальном направлении не будет достигнуто. Действительно, при криогенной температуре и под внутренним давлением оба слоя трубопровода в направлении оси будут деформироваться одновременно, а в направлении радиуса сначала будет деформироваться только лейнер до значения $\epsilon_{\text{рад}} = 0,173$ % и только потом начнет работать композитный слой вплоть до деформации предела текучести стали $\epsilon_T = 0,493$ %.

Следовательно, в радиальном направлении будет реализована прочность углепластика $\overline{\sigma_{k2}} = (\epsilon_T - \epsilon_{\text{рад}})E_k = 403$ МПа. В первом приближении толщину намотки углепластика найдем из уравнений равновесия для цилиндрической оболочки трубопровода в окружном направлении:

$$N_1 = N_x = \frac{P_{\text{раз}}R}{2} = \sigma_T h_M + \overline{\sigma_{k,T}} h_k \cos^2 \beta;$$

$$N_2 = N_y = P_{\text{раз}}R = \sigma_T h_M + \overline{\sigma_{k2}} h_k \sin^2 \beta, \quad (2)$$

где N_x — поперечная сила, Н/м; N_y — погонная сила, Н/м; $\sigma_T = 550$ МПа — напряжение предела текучести металла; $h_M = 0,3$ мм — толщина лейнера; $\beta = 67,5^\circ$ — угол намотки.

Задавшись проектными параметрами, например, $p_{\text{раз}} = 10$ МПа и $R = 35,3$ мм ($d_y = 70$ мм), из уравнения (2) получим $h_k = 0,55$ мм, а в осевом направлении расчетное значение h_k будет значительно меньше.

Однако трубопровод может быть нагружен внутренним давлением и при нормальной температуре, т. е. при $T = 293$ К. Теперь из уравнений (2) при тех же проектных параметрах и пределе текучести металла $\sigma_T = 280$ МПа (см. табл. 1) и $\overline{\sigma_{k,T}} = 1270$ МПа (см. табл. 2) получим $h_{k(1)} = 0,50$ мм, а из второго $h_{k(2)} = 0,26$ мм. Таким образом, окончательно принимаем толщину слоя намотки углепластика

$h_k = 0,55$ мм под углом $\beta = 67,5^\circ$ и определяем погонную массу комбинированной оболочки трубопровода по формуле

$$M_{об}^{кмб} = \pi d_m (h_m \rho_m + h_k \rho_k) M_{об}^{кмб} = \pi d_m (h_m \rho_m + h_k \rho_k) \cdot 100 \text{ см} = 0,718 \text{ кг},$$

где $d_m = 70,6$ мм — диаметр лейнера; $\rho_m = 7,9$ г/см³ — плотность металла; $\rho_k = 1,58$ г/см³ — плотность композита.

Расчетная масса равновеликой по разрушающему давлению трубы из стали 12Х18Н10Т ($h_m = 1,0$ мм) будет равна 1,75 кг, а трубопровода из алюминиевого сплава АМг-6 ($h_m = 2,0$ мм) — 1,22 кг, т. е. в 2,44 и 1,70 раза больше массы комбинированной оболочки.

Заключение. Разработана методика определения и выбора угла армирования композитной оболочки комбинированного трубопровода, при захолаживании которого вплоть до криогенной температуры обеспечивается одинаковый уровень значений температурных деформаций металлического лейнера и намотанного композита.

Испытания на термоциклирование (захолаживание — отогрев) и разрушение давлением жидкого азота (≈ -180 °С) цилиндрических образцов трубопроводов диаметром 50 мм с толщиной лейнера 0,3 мм и слоя углепластика 0,52 мм показали, что образование складок и гофров на тонкостенной металлической оболочке не происходит, а образцы разрушились при давлении 13,0...15,8 МПа.

Конструкторско-технологическое проектирование криогенных трубопроводов диаметром 70 мм на основе ультратонкого стального лейнера и намотанного углепластика позволило снизить его погонную массу на 59 % и 41 % соответственно по сравнению с расчетной массой, равновеликой по разрушающему давлению трубы из стали 12Х18Н10Т ($h_m = 1,0$ мм) и из алюминиевого сплава АМг-6 ($h_m = 2,0$ мм).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патрунов Ф.Г. *Ниже 120 градусов по Кельвину*. Москва, Знание, 1989, 176 с.
- [2] Мохов В. Первый разгонный блок 12КРБ отправлен в Индию. *Новости космонавтики*, 1998, № 21/22, с. 42–43.
- [3] Журавин Ю. «Море» планов «Ангары». *Новости космонавтики*, 1999, № 3 (194), 1999, с. 48–49.
- [4] 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.
- [5] Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 1, с. 16–20.
- [6] Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т. и др. *Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации: Справочник-воспоминание для всех*. В.Т. Климов, науч. ред. Москва, Московский рабочий, 2001, 223 с.

- [7] Федоров Г., Максимович Г. Самолет завтрашнего дня — Ту-155 на водородном топливе: АНТК им. А.Н. Туполева. *Крылья Родины*, 1988–1992.
- [8] 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.
- [9] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 431 с.
- [10] Вигли Д.А. *Механические свойства материалов при низких температурах*. Москва, Мир, 1974, 374 с.
- [11] Красовский А.Я., ред. *Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах*. Киев, Наукова думка, 1988, 239 с.
- [12] Вышвенюк В.И. Тепловое расширение конструкционных волокнистых композитов. *ГОНТИ, сер. VIII, № 52*. Москва, ЦНТИ «Поиск», 1987.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Потапов Д.А., Кудрявцев А.А. Оптимизация угла намотки углепластика на металлический лейнер криогенного трубопровода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1673>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения и композитных конструкций. e-mail: cm12@cm.bmstu.ru; m_komkov@list.ru

Потапов Дмитрий Алексеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Кудрявцев Анастасий Александрович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух статей в области технологии ракетно-космического машиностроения, призер Международного конкурса студенческих работ Quality Education, участник нескольких конференций.

Optimizing the angle of winding carbon fiber reinforced plastic on the metal liner of the cryogenic pipeline

© М.А. Комков, Д.А. Потанов, А.А. Кудрявцев

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study shows the importance of creating cryogenic pipelines for propulsion systems of aircraft from combined materials based on an ultra-thin steel liner and wound carbon fiber reinforced plastic. We analyzed the pipeline's cooldown to cryogenic temperatures and found out that due to a significant difference in coefficients of linear thermal expansion of the liner and carbon fiber reinforced plastic materials, the axial stability can be lost with the formation of plications in a thin-walled steel shell. We suggest a technique for determining and selecting the angle of winding carbon fiber reinforced plastic, in which the axial deformations of a thin-walled liner and a wound composite will have the same level of deformation.

Keywords: pipeline, combined shell, cryogenic temperature, linear expansion coefficient

REFERENCES

- [1] Patruncov F.G. *Nizhe 120 gradusov po Kelvinu* [Below 120 degrees Kelvin]. Moscow, Znanie Publ., 1989, 176 p.
- [2] Mokhov V. *Novosti kosmonavтики* [Cosmonautics news], 1998, no. 21/22, pp. 42–43.
- [3] Zhuravin Yu. *Novosti kosmonavтики* [Cosmonautics news], 1999, no. 3 (194), 1999, pp. 48–49.
- [4] Bulanov I.M., Komkov M.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 14–24.
- [5] Sabelnikov V.V., Komkov M.A., Samoryadov A.V. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science. Series D*, 2005, no. 1, pp. 16–20.
- [6] Andreev V.A., Borisov V.D., Klimov V.T. et al. *Vnimanie: gazy. Kriogennoe toplivo dlya aviatsii: Spravochnik-vospominanie dlia vseh* [Important: gases. Cryogenic fuel for aviation: a Handbook of recollection for everyone]. Moscow, Moskovskiy rabochiy Publ., 2001, 223 p.
- [7] Fedorov G., Maksimovich G. *Kryl'ya Rodiny* [Wings of the Motherland], 1988–1992.
- [8] Komkov M.A., Tarasov V.A., Borodulin A.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2012, no. 4, pp. 78–85.
- [9] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya* [Technology of winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 431 p.
- [10] Vigli D.A. *Mekhanicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh* [Mechanical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mir Publ., 1974, 374 p.
- [11] Krasovskiy A.Ya., ed. *Prochnost materialov i konstruksiy pri kriogennykh temperaturakh* [Strength of materials and structures at cryogenic temperatures]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988, 239 p.
- [12] Vyshvenyuk V.I. *GONTI, ser. VIII*, no. 52. Moscow, TsNTI Poisk Publ., 1987.

Komkov M.A., Dr. Sc. (Eng.), Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 130 scientific papers in the field of rocket-and-space engineering technologies and composite structures.
e-mail: cm12@cm.bmstu.ru; m_komkov@list.ru

Potapov D.A., student, Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University.

Kudryavtsev A.A., student, Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of two articles in the field of rocket-and-space engineering technologies, prize-winner of the International competition of student works Quality Education, participant of several conferences.