

УДК 62-621.2

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-83-89

Теоретическая оценка времени захлаживания бака жидкого водорода при испытании на прочность

Н.О. Борщев, О.А. Юранев

АО «ЦНИИМаш»

Theoretical Estimate of Cooling Time of a Liquid Hydrogen Tank during Structural Tests

N.O. Borshev, O.A. Yuranev

JSC "TsNIIMash"

В России продолжают работы по созданию ракетно-космических транспортных средств на базе криогенных компонентов топлива (жидких водорода, кислорода и метана). При этом важное значение приобретают вопросы отработки температурной прочности топливных баков. При прочностных испытаниях имитируются эксплуатационные температуры испытываемого объекта, так как температурное состояние влияет на прочность и жесткость конструкции. Исходя из этого при экспериментальной наземной отработке водородных баков их необходимо захлаживать до температуры кипения водорода (20 К). В АО «ЦНИИМаш» ведутся работы по созданию гелиевой системы, способной захладить крупногабаритные конструкции до температуры 20 К. Так как температура кипения гелия (4 К) ниже, чем у водорода, его можно использовать в газообразном состоянии для захлаживания конструкции. До настоящего времени охлаждение баков происходило только заливкой жидкого азота, поэтому моделирование их температурного состояния при испытаниях проведено только для этого случая. Для определения целесообразности применения подобного метода захлаживания выполнена оценка времени охлаждения до 20 К крупногабаритных емкостей с помощью газообразного гелия на примере захлаживания водородного бака, по своим размерам характерного для второй ступени перспективной ракеты-носителя среднего класса.

Ключевые слова: лучисто-конвективный теплообмен, газообразный гелий, алюминиевый бак, конвективная теплоотдача, водородный бак, уравнение теплопроводности

Russian enterprises continue developing rocket and space vehicles based on cryogenic propellants, i.e. liquid hydrogen, oxygen, and methane. Hence, the issues of fuel tanks' thermal strength are increasingly important. During structural tests, the operating temperatures of the test object should be simulated, since the temperature condition affects the strength and rigidity of the structure. Consequently, during ground-based experimental tests, hydrogen tanks must be cooled down to 20 K, the boiling point of hydrogen. JSC TsNIIMash is developing a helium system capable of cooling large-sized structures to a temperature of 20 K. Helium can be used in a gaseous state to cool down the structure, since the boiling point of helium, 4 K, is lower than the boiling point of hydrogen. Until now, the tanks were cooled only by filling with liquid nitrogen, therefore the temperature state of the tanks during the tests was simulated only for this case. In order to determine the applicability of the method developed, the cooling time of large-sized containers was estimated by cooling a hydrogen tank, which by its dimensions is typical for an advanced medium-class second stage launcher, to 20 K by gaseous helium.

Keywords: radiant-convective heat exchange, gaseous helium, aluminum tank, convective heat transfer, hydrogen tank, thermal conductivity equation

Отработка температурной прочности топливных баков — важный этап разработки ракетно-космических транспортных средств на базе криогенных компонентов топлива: жидких водорода, кислорода и метана [1]. Специалисты АО «ЦНИИМаш» занимаются созданием гелиевой системы, способной заохладить крупногабаритные баки до температуры 20 К [2–5].

Суть охлаждения бака газообразным гелием заключается в следующем. Через бак прокачивают холодный газообразный гелий (рис. 1), температуру которого можно понизить до 5...6 К. Начальное давление в баке принимают равным атмосферному, считая, что воздушная среда в баке заменена газообразным гелием.

Процесс охлаждения можно осуществить двумя способами: циркуляцией гелия с температурой не выше 20 К и с температурой, изменяемой по ступенчатому закону. Для расчетов выбран первый способ.

Сверху и снизу бака установлены силовые кольца для передачи на него статических усилий. Так как силовые кольца могут соприкасаться со шпангоутами бака, они способны изменить внешний приток теплоты, который необходимо учитывать в расчетах. Обычно такие кольца изготавливают из недорогой и технологичной стали 20 и имеют массу около 5 т.

Для расчетов выбран модельный бак вместимостью примерно 100 м³, выполненный из алюминиевого сплава и состоящий из цилиндрической обечайки диаметром $d = 3,8$ м и высотой $h = 8$ м и двух сферических днищ с радиусом кривизны 3 м. Масса бака принята равной 1200 кг. Предполагаем, что он соответствует размерам водородного бака, который может войти в состав второй ступени перспективной ракеты космического назначения среднего класса, изготовленной по тандемной схеме.

Принимаем, что на баке смонтирован (методом напыления) слой теплоизоляции типа ППУ толщиной 0,15 м с постоянным коэффициентом теплопроводности, равным 0,03 Вт/(м·К). Считаем, что теплоизоляция имеет постоянную плотность 90 кг/м³, а теплоемкость, зависящая от температуры, определяется методом интерполяции.

Цель работы — определение времени заохлаживания водородного топливного ракетного бака при испытании на прочность.

Тепловая физико-математическая модель объекта исследования. Анализ работ [6–11]

показал, что тепловое состояние алюминиевого бака целесообразно оценивать методом тепловых балансов (методом изотермических узлов), где принято, что каждый узел имеет одинаковую температуру в конкретный момент времени. В указанных работах хладагентом являлся азот, в предложенной модели — газообразный гелий.

Такая тепловая модель хорошо зарекомендовала себя при оценке теплового состояния конструкций [6–11], поэтому ее взяли за основу. Тепловую модель доработали в части учета неконтролируемых тепловых потерь через теплоизоляцию бака, которая подвержена сложному лучисто-конвективному нагреву от внешней среды в свободном объеме и зависимости всех теплофизических характеристик от температуры.

Указанный подход позволяет получить более точное распределение температуры по стенке бака, что критически важно при его заохлаживании газообразным гелием, так как в первые моменты времени за счет большой разницы температур стенки и теплоносителя происходит большой теплосъем от конструкции бака.

Предполагаем, что в бак поступает газообразный гелий с постоянной температурой на входе $T_{вх} = 20$ К. Главным фактором заохлаживания стенок бака является конвективная теплоотдача к ядру газообразного гелия, а также

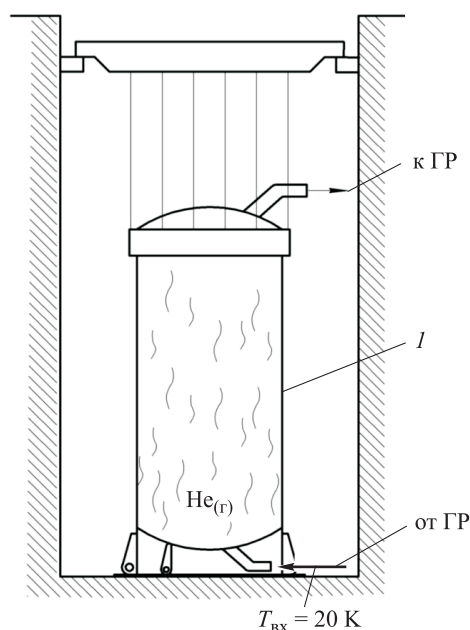


Рис. 1. Схема охлаждения до 20 К крупногабаритного топливного водородного бака I с помощью газообразного гелия $He_{(г)}$

его расход на входе и выходе через дренажное отверстие.

Схема охлаждения до 20 К крупногабаритного топливного бака с помощью газообразного гелия $He_{(г)}$, поступающего от гелиевого рефрижератора (ГР), приведена на рис. 1.

Чтобы решить поставленную задачу, используем уравнение теплопроводности для бака и его теплозащитного покрытия (ТЗП) [12].

Проинтегрируем уравнение теплопроводности в декартово — евклидовом пространстве по трем координатам и запишем подынтегральные выражения для каждого оператора дифференцирования.

Для алюминиевой оболочки считаем, что перетекание тепловой энергии происходит только в двух направлениях в силу малости толщины алюминиевой стенки. Таким образом, происходит кондуктивный теплоприток со стороны ТЗП и перетекание тепла вдоль бака:

$$\int_0^x \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \right] dx = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_{l_x} - \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_0 = -\alpha_k (T^{Al} - T^{He}) + \frac{\lambda_{ТЗП}(T^{ТЗП})}{\delta_{ТЗП}} (T^{ТЗП} - T^{Al});$$

$$\int_0^y \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial y} \right] dy = \frac{\partial}{\partial y} \lambda(T^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial y} \Big|_{l_y} - \frac{\partial}{\partial y} \lambda(T^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial y} \Big|_0,$$

где λ и $\lambda_{ТЗП}$ — коэффициенты теплопроводности алюминиевой оболочки и теплозащитного покрытия; $T(M, \tau)$ — температура бака в произвольной точке декартового пространства; T^{Al} , T^{He} и $T^{ТЗП}$ — температура алюминиевой оболочки, газообразного гелия и ТЗП соответственно; l_x и l_y — длины стенок бака в соответствующих направлениях; α_k — коэффициент конвективной теплоотдачи от алюминиевой стенки к ядру газообразного гелия; $\delta_{ТЗП}$ — толщина ТЗП.

Для теплозащитного покрытия принимаем, что перетекание тепловой энергии происходит только в одном направлении в силу малого изменения температуры гелия. Со стороны алюминиевой стенки происходит кондуктивная отдача тепловой энергии, с другой стороны — лучисто-конвективный теплообмен с внешней средой:

$$\int_0^x \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T^{ТЗП}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \right] dx = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T^{ТЗП}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_{l_x} - \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T^{ТЗП}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_0 = -\frac{\lambda_{ТЗП}(T^{ТЗП})}{\delta_{ТЗП}} (T^{ТЗП} - T^{Al}) + \varepsilon_{ТЗП} \sigma (T^{ТЗП4} - T_{cp}^4) - \alpha_k^{cb} (T^{ТЗП}, T_{cp}) (T^{ТЗП} - T_{cp}),$$

где $\varepsilon_{ТЗП}$ — излучательно-поглощательная способность ТЗП; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$; T_{cp} — температура внешней среды; α_k^{cb} — коэффициент свободной конвективной теплоотдачи от алюминиевой стенки к ядру газообразного гелия.

Для стального кольца считаем, что перетекание тепловой энергии происходит только в одном направлении из-за его сравнительно малой толщины. Со стороны алюминиевой стенки происходит кондуктивная отдача тепловой энергии, с другой стороны — лучисто-конвективный теплообмен с внешней средой:

$$\int_0^x \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T_{i,j}^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \right] dx = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T_i^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_{l_x} - \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T_i^{Al}) \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial x} \Big|_0 = \frac{\lambda(T_i^{ct})}{\delta_{Al}} (T_{i+1}^{ct} - T_i^{ct}) + \frac{\lambda(T_i^{ct})}{\delta_{Al}} (T_i^{ct} - T_i^{Al}) + \varepsilon_i \sigma [(T_i^{ct})^4 - T_{cp}^4] - \alpha_k^{cb} (T_i^{ct} - T_{cp}),$$

где T_i^{ct} — температура стального кольца; δ_{Al} — толщина алюминиевой оболочки; ε_i — излучательно-поглощательная способность материала;

Таким образом, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающих тепловое состояние конструкции [13].

ОДУ для изотермических узлов алюминиевой конструкции имеет вид

$$C(T_i^{Al}) \rho(T_i^{Al}) \frac{\partial T_i^{Al}(\tau)}{\Delta \tau} = -\alpha_k^{вн} (T_i^{Al} - T_i^{He}) + \frac{\lambda(T_i^{Al})}{h_{Al}} (T_{i+1}^{Al} - T_i^{Al}) + \frac{\lambda_{ТЗП}(T_i^{ТЗП})}{h_{ТЗП}} (T_i^{ТЗП} - T_i^{Al});$$

$$T_i^{Al}(0) = 20 \text{ К};$$

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} = \frac{\text{Nu}_d \lambda_{\text{He}}}{d},$$

где C — теплоемкость материала; ρ — плотность материала; $\Delta\tau$ — шаг интегрирования по времени; h_{Al} и $h_{\text{ТЗП}}$ — высота алюминиевого бака и ТЗП; $T_i^{\text{Al}}(0)$ — значение температуры алюминиевой оболочки в начальный момент времени; $\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}}$ — коэффициент вынужденной конвективной теплоотдачи; Nu_d — число Нуссельта для диаметра бака d ; λ_{He} — коэффициент теплопроводности газообразного гелия.

Число Нуссельта Nu_d находим из выражения [8]

$$\text{Nu}_l = 0,025 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{0,7} \right],$$

где Nu_l — число Нуссельта для высоты бака l ; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

ОДУ для изотермических узлов ТЗП имеет вид

$$\begin{aligned} C(T_i^{\text{ТЗП}}) \rho(T_i^{\text{ТЗП}}) \delta_{\text{ТЗП}} \frac{\partial T_i^{\text{Al}}}{\Delta\tau} = \\ = - \frac{\lambda_{\text{ТЗП}}(T_i^{\text{ТЗП}})}{h_{\text{ТЗП}}} (T_i^{\text{ТЗП}} - T_i^{\text{Al}}) + \\ + \varepsilon_i \sigma \left[(T_i^{\text{ТЗП}})^4 - T_{\text{ср}}^4 \right] - \alpha_{\text{к}}^{\text{св}}(T_i^{\text{ТЗП}}, T_{\text{ср}}) (T_i^{\text{ТЗП}} - T_{\text{ср}}). \end{aligned}$$

Процесс теплообмена между силовым кольцом и внешней средой характеризуется свободным движением воздуха и таким образом критерий Нуссельта определяется произведением чисел Грасгофа Gr и Прандтля при обтекании вертикальной стенки свободномолекулярным потоком воздуха [8]:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_l = 0,75 [\text{Gr}(T) \text{Pr}(T)]^{0,25}; \\ \text{Gr}_l = \frac{g \beta \rho^2 (T_i^{\text{ТЗП}} - T_{\text{ср}})^3}{\eta T^2}, \end{aligned}$$

где g — ускорение свободного падения; β — коэффициент расширения пара; η — кинематическая вязкость; T — температура теплоносителя.

Коэффициент расширения пара определяется выражением

$$\beta = \frac{1}{T_i^{\text{He}}}.$$

Тогда коэффициент свободной конвективной теплоотдачи от стенки алюминиевого бака к ядру гелия

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{св}} = \frac{\text{Nu}_l \lambda_{\text{в}}(T)}{l},$$

где $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности теплоносителя.

ОДУ для первого и второго изотермических узлов гелия имеют вид

$$\begin{aligned} C_p(T_1^{\text{He}}) \rho(T_1^{\text{He}}) \frac{\partial T_1^{\text{He}}}{\Delta\tau} V_1^{\text{He}} = \\ = C_p(T_1^{\text{He}}) G_{\text{вх}} (T_{\text{вх}}^{\text{He}} - T_1^{\text{He}}) F_{\text{He}} + \\ + \alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} (T_i^{\text{Al}} - T_1^{\text{He}}) F_{\text{конв}}; \\ C_p(T_2^{\text{He}}) \rho(T_2^{\text{He}}) \frac{\partial T_2^{\text{He}}}{\Delta\tau} V_2^{\text{He}} = \\ = C_p(T_2^{\text{He}}) G_{\text{вых}} (T_{\text{вых}}^{\text{He}} - T_2^{\text{He}}) F_{\text{He}} + \\ + \alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} (T_i^{\text{Al}} - T_2^{\text{He}}) F_{\text{конв}}; \end{aligned}$$

$$F_{\text{He}} = \frac{\pi d^2}{4}; \quad F_{\text{конв}} = \pi d l; \quad V_i^{\text{He}} = \frac{\pi d^2 h_i}{4}; \quad i = 1, 2,$$

где C_p — изобарная теплоемкость теплоносителя.

Расход паров гелия на входе в бак

$$G_{\text{вх}} = \sqrt{2 \rho_{\text{вх}} (p_{\text{вх}} - p)},$$

где $\rho_{\text{вх}}$ — плотность теплоносителя на входе; $p_{\text{вх}}$ — давление внешней среды на входе в бак; p — давление внутри бака

Расход паров гелия на выходе из бака

$$G_{\text{вых}} = \frac{F_{\text{др}} p}{\sqrt{R T_{\text{п max}}}} f\left(\gamma, \frac{p_0}{p}\right),$$

где $F_{\text{др}}$ — площадь дренажного отверстия; R — газовая постоянная; $T_{\text{п max}}$ — максимальная температура пара, $T_{\text{п max}} = 293 \text{ K}$; γ — показатель адиабаты паров гелия; p_0 — давление внешней среды на выходе из бака.

Показатель адиабаты паров гелия определяется следующим образом:

$$f\left(\gamma, \frac{p_0}{p}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} & \text{при } \frac{p_0}{p} \geq \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; \\ \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} & \text{при } \frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \end{cases}$$

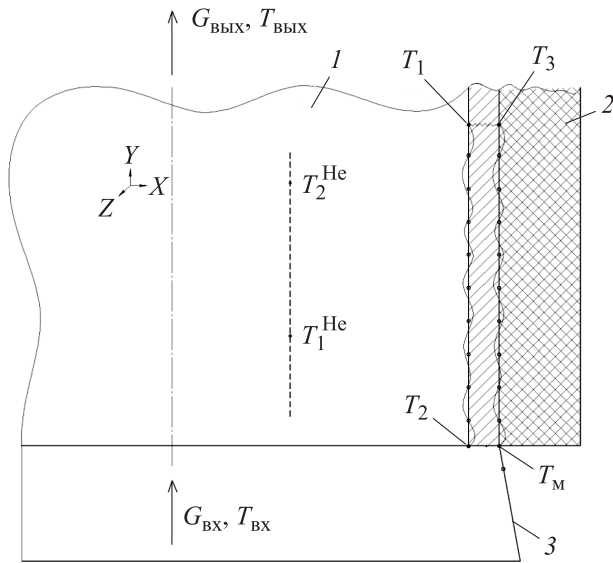


Рис. 2. Расчетная тепловая схема алюминиевого бака, захлаживаемого газообразным гелием:
 1 — алюминиевый бак; 2 — ТЭП; 3 — силовое кольцо;
 T_M — температура силового кольца; $T_{\text{вых}}$ — температура паров гелия на выходе из алюминиевого бака

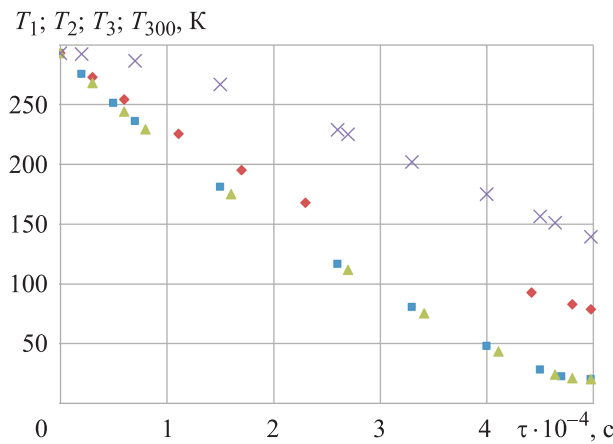


Рис. 3. Зависимость температуры характерных изотермических узлов стенки бака T_1 (■), T_2 (◆), T_3 (▲) и силового кольца T_{300} (×) от времени захлаживания τ

Температура газообразного гелия на входе в бак в начальный момент времени

$$T_i^{\text{He}}(0) = 20 \text{ K.}$$

ОДУ для изотермических узлов стального силового кольца имеет вид

$$C_p(T_i^{\text{ст}})\rho(T_i^{\text{ст}})\frac{\partial T_i^{\text{ст}}}{\Delta\tau}\delta_{\text{ст}} = \\ = \frac{\lambda(T_i^{\text{ст}})}{h_{\text{Al}}}(T_{i+1}^{\text{ст}} - T_i^{\text{ст}}) + \frac{\lambda(T_i^{\text{ст}})}{h_{\text{Al}}}(T_i^{\text{ст}} - T_i^{\text{Al}}) + \\ + \varepsilon_i\sigma[(T_i^{\text{ст}})^4 - T_{\text{ср}}^4] - \alpha_{\text{кв}}^{\text{св}}(T_i^{\text{ст}}, T_{\text{ср}})(T_i^{\text{ст}} - T_{\text{ср}}).$$

Данная система уравнений решена методом Рунге — Кутты четвертого порядка точности [14]. Характеристики гелия взяты из работы [15].

Оценим тепловое состояние бака на примере его расчета в характерных изотермических узлах, показанных на рис. 2.

Результаты оценки теплового состояния конструкции и времени захлаживания в характерных изотермических узлах, показанных на рис. 2, приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, температуры T_1 и T_3 практически совпадают. В точке соприкосновения (стыка) алюминиевого бака с силовым кольцом для первого из них температура составила 78 К, для второго — примерно 79 К. На расстоянии 300 мм от этого стыка температура силового кольца T_{300} составляет 140 К, на расстоянии 1000 мм от стыка — 233 К.

Вывод

Анализ полученных результатов показал, что крупногабаритные топливные баки можно охладить до температуры 20 К с помощью газообразного гелия. Причем температура стенки бака достигает этой температуры не более чем за 50 000 с (~14 ч), что является приемлемым с точки зрения временных затрат на прочностные испытания.

Литература

[1] Паничкин Н.Г., ред. ЦНИИМаш. Центр исследований прочности. История развития. Королев, ЦНИИМаш, 2001. 342 с.
 [2] Васюкова Д.А., Колозезный А.Э., Юранев О.А. Использование криогенной гелиевой системы для имитации эксплуатационных температур при испытаниях на прочность баков жидкого водорода перспективных средств выведения. *Космонавтика и ракетостроение*, 2012, № 2, с. 179–186.
 [3] Васюкова Д.А., Колозезный А.Э., Юранев О.А. Эффективный подход к проведению зачетных прочностных испытаний криогенных баков перспективных средств выведения. *Авиакосмическая техника и технология*, 2013, № 1, с. 23–25.

- [4] Васюкова Д.А., Колоезный А.Э., Юранев О.А. Квалификация способов расчета захлаживания крупногабаритной испытательной сборки «криогенного» топливного бака РКН при свободной конвекции газообразного хладагента. *Полет*, 2015, № 7, с. 18–24.
- [5] Юранев О.А. Исследования различных способов захлаживания криогенных топливных баков изделий ракетно-космической техники. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 3, с. 50–57, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-3-50-57>
- [6] Горбачев С.П., Попов В.П., Славин М.В. Определение времени захлаживания криогенного бака. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2006, № 5, с. 43–53.
- [7] Александров А.А., Бармин И.В., Денисова К.И. и др. Инновационная модель применения жидкого азота для охлаждения ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 3, с. 4–17, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-3-4-17>
- [8] Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Методика моделирования охлаждения компонентов ракетного топлива с применением жидкого азота и промежуточного теплоносителя. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 3, URL: <http://engineering-science.ru/doc/699941.html>
- [9] Горбачев С.П., Кириенко К.И. Моделирование режимов заправки криогенного емкостного оборудования. *Вести газовой науки*, 2015, № 1, с. 124–132.
- [10] Александров А.А., Бармин И.В., Кунис И.Д. и др. Особенности создания и развития криогенных систем ракетно-космических стартовых комплексов «Союз». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 2, с. 7–27, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-2-7-27>
- [11] Сафонов В.С. Обоснование режимных параметров технологических трубопроводов комплексов СПГ с учетом требований промышленной безопасности. *Вести газовой науки*, 2017, № 1, с. 83–99.
- [12] Бермант А.Ф. *Краткий курс математического анализа*. Москва, Наука, 1965. 664 с.
- [13] Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. *Свободно-конвективный теплообмен*. Минск, Наука и техника, 1982. 399 с.
- [14] Деккер К., Вервер Я. *Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений*. Москва, Мир, 1988. 332 с.
- [15] Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. и др. *Термодинамические свойства гелия*. Москва, Изд-во стандартов, 1984. 320 с.

References

- [1] Panichkin N.G., ed. *TsNII mash. Tsentri issledovaniy prochnosti. Istoriya razvitiya* [TsNII-mash. Center of strength studies. History of development]. Korolev, TsNII mash Publ., 2001. 342 p. (In Russ.).
- [2] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. Using cryogenic helium system for exploitation temperatures imitation in strength tests of liquid hydrogen tanks of advanced launch vehicles. *Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2012, no. 2, pp. 179–186. (In Russ.).
- [3] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. Effective approach to control strength test works for cryogenic tanks of advanced launch vehicles. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace technology], 2013, no. 1, pp. 23–25. (In Russ.).
- [4] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. Qualification of method for prediction of gas free convection cooling of the full-scaled test article of a launcher cryogenic tank. *Polet* [Flight], 2015, no. 7, pp. 18–24. (In Russ.).
- [5] Yuranev O.A. Investigating various ways of cooling cryogenic fuel tanks of aerospace equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostroyeniye*. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 3, pp. 50–57, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-3-50-57> (in Russ.).
- [6] Gorbachev S.P., Popov V.P., Slavin M.V. Determination of cooling time for cryogenic tank. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2006, no. 5, pp. 43–53. (In Russ.).

- [7] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Denisova K.I., et al. Innovative model of liquid nitrogen application for cooling rocket fuel tanks filling the ground-based systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2017, no. 3, pp. 4–17, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-3-4-17> (in Russ.).
- [8] Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. Simulation methods of rocket fuel refrigerating with liquid nitrogen and intermediate heat carrier. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 3, URL: <http://engineering-science.ru/doc/699941.html> (in Russ.).
- [9] Gorbachev S.P., Kirienko K.I. Simulation of the filling modes of cryogenic capacitive equipment. *Vesti gazovoy nauki*, 2015, no. 1, pp. 124–132. (In Russ.).
- [10] Aleksandrov A.A., Barmin I.V., Kunis I.D., et al. Characteristic features of creating and developing cryogenic systems of space-rocket launch complex "Soyuz". *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 2, pp. 7–27, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-2-7-27> (in Russ.).
- [11] Safonov V.S. Substantiation of operating conditions for industrial pipe-lines of liquefied natural gas complexes with provision for safety requirements. *Vesti gazovoy nauki*, 2017, no. 1, pp. 83–99. (In Russ.).
- [12] Bermant A.F. *Kratkiy kurs matematicheskogo analiza* [Short course of mathematical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 664 p. (In Russ.).
- [13] Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen* [Free convective heat transfer]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 399 p. (In Russ.).
- [14] Dekker K., Verwer J.G. *Stability of Runge-Kutta methods for stiff nonlinear differential equations*. Elsevier Science, 1984. 307 p. (Russ. ed.: *Ustoychivost' metodov Runge-Kutty dlya zhestkikh nelineynykh differentsial'nykh uravneniy*. Moscow, Mir Publ., 1988. 332 p.).
- [15] Sychev V.V., Vasserman A.A., Kozlov A.D., et al. *Termodinamicheskie svoystva geliya* [Thermodynamics properties of helium]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1984. 320 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.05.2021

Информация об авторах

БОРЩЕВ Никита Олегович — инженер второй категории отдела тепловых режимов КА и воздействия ФКП. АО «ЦНИИМаш» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Пионерская, д. 4, корп. 22, e-mail: borshchevno@tsniimash.ru).

ЮРАНЕВ Олег Александрович — начальник лаборатории отдела температурно-статической прочности. АО «ЦНИИМаш» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Пионерская, д. 4, корп. 22, e-mail: juranevoa@tsniimash.ru).

Information about the authors

BORSCHEV Nikita Ologovich — Engineer of the second category, Department of Spacecraft Thermal Modes and the Impact of Space Flight Factor. JSC "TsNIIMash" (141070, Korolev, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, Block 22, e-mail: borshchevno@tsniimash.ru).

YURANEV Oleg Aleksandrovich — Head of the Laboratory of the Department of Temperature and Static Strength. JSC "TsNIIMash" (141070, Korolev, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, Block 22, e-mail: juranevoa@tsniimash.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Борщев Н.О., Юранев О.А. Теоретическая оценка времени захлаживания бака жидкого водорода при испытании на прочность. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 83–89, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-83-89

Please cite this article in English as:

Borshev N.O., Yuranev O.A. Theoretical Estimate of Cooling Time of a Liquid Hydrogen Tank during Structural Tests. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 83–89, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-83-89