

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

О.А. Юранев

juranevoa@tsniimash.ru

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,  
г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Современные тенденции ракетостроения связаны с использованием в качестве компонентов топлива жидких метана и водорода. Традиционные методы захлаживания криогенных топливных баков изделий ракетно-космической техники не позволяют достоверно имитировать эксплуатационные температуры и влияние гидростолба жидкости на конструкцию, поэтому становится актуальным вопрос поиска новых технологий захлаживания для решения данных проблем. Рассмотрены различные методы захлаживания криогенных баков, их преимущества и недостатки, выявлены наиболее перспективные методы

### Ключевые слова

*Криогенные топливные баки, захлаживание, жидкий азот, жидкий водород, жидкий кислород, газообразный гелий*

Поступила в редакцию 25.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** В настоящее время наиболее перспективными компонентами топлива для ступеней ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ) считаются криогенные компоненты топлива (жидкий кислород, жидкий метан и жидкий водород) [1, 2], позволяющие получать высокий удельный импульс ЖРД. Дополнительным положительным моментом применения криогенных топлив является процесс упрочнения некоторых алюминиевых сплавов при криогенных температурах, который можно использовать для утонения баков и уменьшения массы их конструкции.

С точки зрения объективности имитации эксплуатационных факторов при проведении испытаний на прочность необходимо баки захлаживать теми же самыми криогенными жидкостями, на которые они спроектированы. Но в лабораторных условиях использование данных жидкостей затруднительно и нецелесообразно с точки зрения пожаровзрывобезопасности. До настоящего времени отработка прочности криогенных баков осуществлялась только с использованием (заливкой) жидкого азота [3, 4]. При этом происходило небольшое переохлаживание (на 13 °С) баков жидкого кислорода и недоохлаживание (на 57 °С) баков жидкого водорода. Баки жидкого метана в истории отечественной космонавтики пока не проходили экспериментальных испытаний на прочность. В настоящей статье рассмотрены всевозможные способы захлаживания криогенных баков, способы проанализированы с экономической и функцио-

нальной точек зрения и сделан вывод о наиболее перспективном методе захлаживания при экспериментальной отработке прочности вновь создаваемых РН и РБ.

**Захлаживание жидким азотом.** Это «классический» метод захлаживания, заключающийся в заливке в бак жидкого азота, при этом практически вся поверхность бака принимает одну и ту же температуру ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Этим способом захлаживались все криогенные баки, которые проходили отработку прочности в СССР и РФ. Он стал популярным благодаря относительной дешевизне жидкого азота, инертности к материалам и пожаровзрывобезопасности. Одно из основных требований к захлаживающим жидкостям — имитация физических характеристик криогенных топлив. По этому показателю жидкий азот более близок к жидкому кислороду (по температуре кипения и плотности), зато «далек» от жидкого метана и жидкого водорода (как по температуре кипения, так и по плотности). Следует сказать, что нижние днища метановых и водородных баков при расчетном давлении могут не выдержать гидростолба жидкого азота из-за большой разности в плотностях (приблизительно в 2 раза для жидкого метана и 12 раз для жидкого водорода). Поэтому при отработке водородного бака блока «Ц» РН «Энергия» был создан специальный стенд, позволяющий обезвешивать баки во время испытаний. Суть обезвешивания заключалась в том, что бак помещался в специальный бокс, который так же, как и бак, заливался жидким азотом. В итоге жидкий азот находился как внутри, так и снаружи бака, что позволяло обнулить воздействие гидростолба. Для крупногабаритных баков требовался колоссальный объем жидкого азота (не менее двух объемов бака), что существенно влияло на стоимость испытаний.

По мнению автора, в качестве хладагента для захлаживания кислородных баков хорошие перспективные свойства имеет жидкий аргон. Преимущества жидкого аргона перед жидким азотом заключаются в более близкой температуре кипения по сравнению с жидким кислородом (разность всего  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и более высокой плотности, что при небольшой высоте бака будет «работать в запас» прочности конструкции. Недостаток жидкого аргона — более высокая (в 2–2,5 раза) по сравнению с жидким азотом стоимость, что при использовании баков небольшого объема не должно сильно сказываться на стоимости испытаний. В настоящее время в РФ жидкий аргон может производиться в промышленном масштабе.

Отметим, что при заливке азота (аргона) в баки большого объема для защиты строительных конструкций от воздействия криогенных температур необходимо устанавливать бак внутри специального поддона для принятия жидкого азота в случае разрушения бака.

Захлаживание баков заполнением криогенными жидкостями необходимо проводить с определенной скоростью для уменьшения температурных напряжений в конструкции. Чем медленнее будет заполняться бак, тем дольше он будет находиться в среде холодных паров и тем меньше будет градиент температур между элементами конструкции баков и криогенной жидкостью. Причем продолжи-

тельность захлаживания бака и его наполнение сравнимы между собой [5]. Задача испытателей состоит в нахождении оптимального расхода, при котором бак заполнится криогенной жидкостью за умеренное время с возникновением минимальных температурных напряжений.

**Захлаживание газообразным азотом.** Необходимость обезвешивания баков некоторых типов и большие затраты жидкого азота для их заполнения поставили задачу по поиску новых методов захлаживания. Один из которых — захлаживание парами жидкого азота (свободная конвекция газообразного азота). В силу того, что пары жидкого азота имеют температуру, существенно более низкую, чем температура жидкого кислорода и жидкого метана, существует возможность захлаживания ими стенок бака до эксплуатационных температур ( $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Преимущество метода заключается в существенном сокращении затрат жидкого азота для захлаживания баков, что может применяться при проведении криогенно-статических испытаний в случае, когда баки заполнены топливом не полностью. В ЦНИИмаше было проведено расчетное и экспериментальное обоснование такого метода захлаживания. Термодинамический расчет [6] показал, что при заполнении жидким азотом только нижнего днища бака температуру стенок, равную  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , можно достичь через 30...40 мин при открытом дренаже. Такой расчет квалифицирован проведенными испытаниями (рис. 1). Захлаживанию подвергнут маломасштабный имитатор бака с плоскими днищами и вафельной обечайкой, выполненный из сплава АМг6. Снаружи бак покрыт фольгированной теплоизоляцией из вспененного каучука толщиной 50 мм.

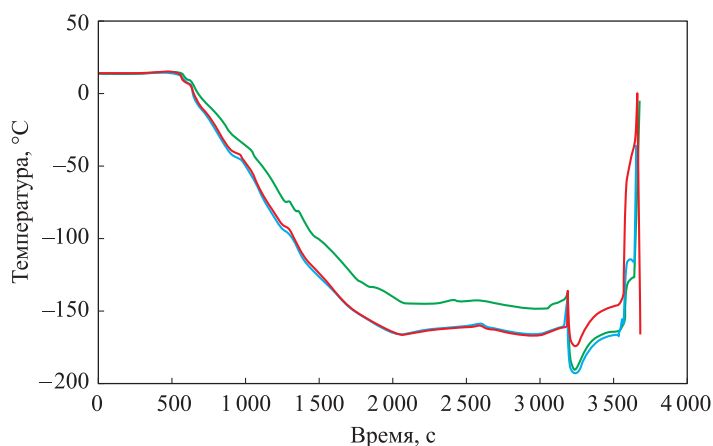


Рис. 1. Зависимость температуры стенки бака от времени в процессе захлаживания

Как следует из рис. 1, примерно на 3200-й с произошло резкое охлаждение стенок практически до температуры жидкого азота. Этот момент времени соответствует разгерметизации бака в районе верхнего днища вследствие превышения внутреннего давления над расчетным, которое произошло из-за недостаточности проходного сечения в дренажной трубке. Во время разгерметизации бака произошел сильный хлопок, после которого давление бака моментально уменьшилось

с 3,5 ати примерно до 0. С большой вероятностью можно предположить, что в данном случае в процессе резкого истечения паров азота из бака в нем возникло разрежение, вследствие чего жидкий азот поднялся до верхнего днища, по пути моментально охладив стенки. Данный процесс можно использовать при захлаживании топливных баков: необходимо парам азота дать возможность повысить давление внутри бака до эксплуатационных значений, затем резко сбросить давление, открыв дренажное отверстие, диаметр которого должен быть не менее 150...200 мм. Если в этом случае даже не возникнет разрежения, то скорость охлаждения стенок бака увеличится за счет интенсификации процесса теплообмена, так как течение газа вдоль стенок примет ярко выраженный турбулентный характер, что наблюдалось во время проведения методических испытаний.

Далее были проведены исследовательские испытания метода захлаживания, который заключается в процессе фонтанирования капельно-газовой смеси специальным разбрызгивателем, установленным в верхней части бака, на внутреннюю поверхность бака. При этом скорость захлаживания бака возросла примерно в 2–3 раза при меньших затратах азота. Захлаживание этим методом начинается с верхней части бака. Холодный азот под действием силы тяжести опускается вниз, охлаждая по пути стенки, при этом охлаждение бака происходит более равномерно, чем в случае захлаживания парами азота, подаваемого в бак снизу.

В целом захлаживание криогенных баков с помощью газообразного азота по сравнению с жидким азотом является более эффективным с экономической точки зрения, поскольку позволяет в разы уменьшить затраты жидкого азота при сопоставимых временных и трудовых затратах.

#### Захлаживание путем орошения жидким азотом внешней поверхности бака.

В этом способе предлагается обеспечить стекание жидкого азота по внешней поверхности бака. При этом случае возможно прохождение процесса перехода от пленочного движения жидкости к кипению. По данным исследовательских работ [7], при охлаждении алюминиевых пластин стекающими пленками жидкого азота коэффициент теплоотдачи составляет 2000...12 000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Даже используя минимальное значение коэффициента теплоотдачи, расчетным путем можно получить, что за несколько десятков секунд стенки бака можно охладить до температуры –196 °С. Рекомендуется данный способ совместить со способом конвективного захлаживания (рис. 2).

**Захлаживание с помощью газообразного гелия.** Эффективной альтернативой строительству крупной водородной базы для отработки водородных баков при проведении криогенно-прочностных

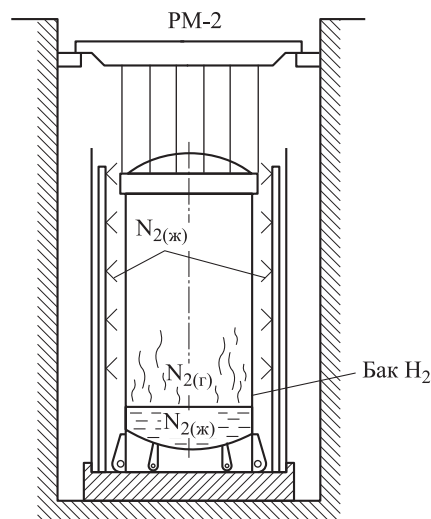


Рис. 2. Схема комбинированного захлаживания изнутри и снаружи

испытаний является использование гелия в качестве хладагента. В Центре прочности ЦНИИмаша было проведено расчетное обоснование использования газообразного гелия для захлаживания криогенных баков [3, 6, 8, 9]. Поскольку температуры кипения самого холодного криогенного топлива — жидкого водорода ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) выше температуры кипения гелия ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), последний можно использовать в газообразном состоянии для захлаживания конструкции (по аналогии с холодными парами азота). С помощью газообразного гелия возможно имитировать любую эксплуатационную температуру криогенных баков. В настоящее время в ЦНИИмаше реализуется проект по созданию криогенной системы с использованием гелиевой установки, работающей по холодильному циклу [10] без расхода рабочего тела. Охлажденный в рефрижераторе гелий циркулирует (рис. 3) между криогенной установкой и баком до тех пор, пока не будет достигнута требуемая температура и большая его часть не скопится в захлаживаемом баке. Установка позволяет доводить давление в баке до 5 при температуре  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до 13 ати при более высоких температурах. После проведения цикла испытаний (в случае отсутствия разрушения) гелий возвращается в хранилище.

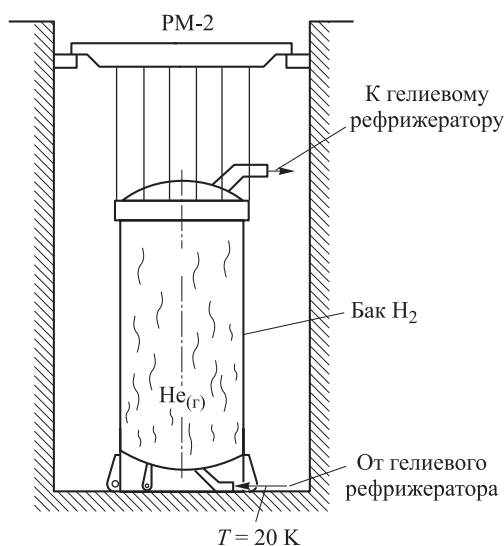


Рис. 3. Схема захлаживания водородного бака газообразным гелием

За рубежом прочностные испытания водородных баков проводятся с использованием жидкого водорода на единственном в своем роде специальном стенде, расположенном в США. Для уменьшения последствий возникновения нештатной ситуации стенд находится на удаленном от населенных пунктов расстоянии. Исходя из сведений, опубликованных в открытой печати, можно с уверенностью сказать, что технологии захлаживания криогенных баков газообразным гелием нет ни в одном испытательном космическом центре мира.

Учитывая опыт проведения испытаний с использованием жидкого азота, автор предлагает более совершенный способ захлаживания баков до температуры

жидкого водорода — двухступенчатое захлаживание. На первой ступени бак охлаждается жидким азотом по одному из методов, приведенных ранее, до температуры примерно  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом необходимо контролировать внутреннее давление в баке, чтобы суммарное действие гидростолба жидкого азота и внутреннего давления не превышало эксплуатационных значений для нижнего днища. После захлаживания бака до температуры  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , необходимо слить жидкий азот при его наличии, после смены азотной среды на гелиевую начать процесс захлаживания бака с помощью гелиевого рефрижератора. Используя такую технологию, можно существенно уменьшить потребную мощность рефрижератора, что снизит стоимость криогенной системы (в том числе за счет уменьшения ее габаритных размеров), а также сократит общее время захлаживания бака, поскольку охлаждение его азотом до температуры  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  произойдет гораздо быстрее, нежели гелием. Последнее позволит уменьшить трудоемкость процесса захлаживания. Строительство подобной установки — недешевое удовольствие, как и сам газообразный гелий. Но если учесть, что предлагаемая технология безрасходная, то капитальные затраты на создание гелиевой установки могут компенсироваться стоимостью увеличенной полезной нагрузки, которую можно будет вывести на орбиту с использованием баков, максимально оптимизированных по массе, в том числе криогенным упрочнением.

**Заключение.** В настоящее время при экспериментальной отработке прочности конструкций РН и РБ для захлаживания топливных баков при проведении криогенно-статических испытаний можно использовать как различные технологии захлаживания, так и криогенные вещества. Для этого при проведении прочностной отработки кислородных и метановых баков предлагается использовать технологию разбрызгивания жидкого азота изнутри верхней части бака, а при испытаниях водородных баков — технологию захлаживания газообразным гелием с предварительным азотным охлаждением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gusev Y., Kolozezny A., Panichkin N. Choice of materials and design of propellant tanks and adjacent structures for future launchers, including RLV // 59th International Astronautical Congress. 2008. P. 5297–5306.
2. Колозезный А.Э. Основы концепции развития экспериментальных технологий обеспечения температурной прочности «криогенных» топливных баков перспективных конкурентоспособных средств выведения // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2 (67). С. 62–69.
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. Паничкин Н.Г., ред. ЦНИИмаш. Центр исследований прочности. История развития. Королёв: ЦНИИмаш, 2001. 342 с.
5. Горбачев С.П., Попов В.П., Славин М.В. Определение времени захлаживания криогенного бака // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 5. С. 43–53.

6. Васюкова Д.А., Колозезный 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.
7. Мацех А.М., Павленко А.Н. Особенности теплообмена и кризисных явлений в стекающих пленках криогенной жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 1. С. 99–112.
8. Васюкова Д.А., Колозезный А.Э., Юранев О.А. Использование криогенной гелиевой системы для имитации эксплуатационных температур при испытаниях на прочность // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2 (67). С. 179–186.
9. Васюкова Д.А., Колозезный А.Э., Юранев О.А. Расчетное обоснование использования криогенной гелиевой установки для имитации эксплуатационных температур при испытаниях на прочность криогенных топливных баков ракет космического назначения // Инновационный арсенал молодежи: труды Третьей научно-технической конференции ФГУП «КБ «Арсенал». СПб.: БГТУ Военмех, 2012. С. 280–282.
10. Архаров А.М., Беляков В.П., Микулин Е.И. и др. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987. 536 с.

**Юранев Олег Александрович** — начальник лаборатории отдела температурно-статической прочности ФГУП ЦНИИмаш (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

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: 10.18698/0236-3941-2018-3-50-57

**INVESTIGATING VARIOUS WAYS OF COOLING CRYOGENIC FUEL TANKS OF AEROSPACE EQUIPMENT**

O.A. Yuranev

juranevoa@tsniimash.ru

**Central Research Institute of Machine Building, Korolev, Moscow Region, Russian Federation**

**Abstract**

Contemporary rocket engineering trends involve using liquid methane and hydrogen as propellant components. Traditional cryogenic fuel tank cooling methods used in aerospace equipment do not simulate realistically either service temperature or the effect of the column of liquid on the structure, which means that finding new cooling technologies capable of solving these problems is a pressing issue. The study considers various cryogenic fuel tank cooling methods, lists their advantages and disadvantages, and determines the most promising techniques

**Keywords**

*Cryogenic fuel tanks, cooling, liquid nitrogen, liquid hydrogen, liquid oxygen, gaseous helium*

Received 25.05.2017  
© BMSTU, 2018

**REFERENCES**

- [1] Gusev Y., Kolozezny A., Panichkin N. Choice of materials and design of propellant tanks and adjacent structures for future launchers, including RLV. *59th International Astronautical Congress*, 2008. P. 5297–5306.

- [2] Kolozeznyy A.E. Conceptual fundamentals for developing experimental technologies for cryogenic propellant tank thermal strength assurance of future competitive launch vehicles. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2012, no. 2 (67), pp. 62–69 (in Russ.).
- [3] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. Effective method for qualification testing future cryogenic tanks of launch vehicles. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 1, pp. 23–25 (in Russ.).
- [4] Panichkin N.G., ed. TsNIImash. Tsentr issledovaniy prochnosti. Istoriya razvitiya [TsNIImash. Strength research center. History of development]. Korolev, TsNIImash Publ., 2001. 342 p.
- [5] Gorbachev S.P., Popov V.P., Slavin M.V. Calculation of cooldown time for cryogenic tank. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2006, no. 5, pp. 43–53 (in Russ.).
- [6] 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.).
- [7] Matsekh A.M., Pavlenko A.N. Heat transfer and crisis phenomena in the falling films of cryogenic liquid. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2005, vol. 12, no. 1, pp. 99–112 (in Russ.).
- [8] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. Use of cryogenic helium system for operation temperature simulation in structural tests. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2012, no. 2 (67), pp. 179–186 (in Russ.).
- [9] Vasyukova D.A., Kolozeznyy A.E., Yuranev O.A. [Calculating justification of using the cryogenic helium installation for operational temperatures simulation at structural tests of the cryogenic spacecraft fuel tanks]. *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy Tret'yey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii FGUP «KB «Arsenal»* [Innovative Arsenal of Youth: Proc. 3d Sci.-Tech. Conf. of FGUP "KB "Arsenal"]. Sankt-Petersburg, BGTU Voenmekh Publ., 2012. P. 280–282.
- [10] Arkharov A.M., Belyakov V.P., Mikulin E.I., et al. Kriogennyye sistemy [Cryogenic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 536 p.

**Yuranev O.A.** — Head of Laboratory, Thermal Static Strength Department, Central Research Institute of Machine Building (Pionerskaya ul. 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Yuranev O.A. Investigating Various Ways of Cooling Cryogenic Fuel Tanks of Aerospace Equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 3, pp. 50–57 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-50-57