

УДК 536.21: 536.48

Г.Г. ЖУНЬ

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина***УСКОРЕНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В КРИОСОСУДЕ**

Предложен способ ускорения на 40-50 часов процесса стабилизации температурного поля в криососудах с теплозащитой из пакета экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) после заполнения его жидким азотом, что позволяет уменьшить на ~20 % производственные площади для их тепловых испытаний. С этой целью в их горловинах необходимо использовать сначала (в течение 21 часа) плотную полистироловую пробку с центральным сквозным отверстием, изолирующую холодные пары азота от ее стенок и препятствующую переохлаждению слоев ЭВТИ. Затем в горловине криососуда следует применять серийную полистироловую пробку, которая имеет с ней зазор, что обеспечивает охлаждение ее выходящими парами криоагента.

Ключевые слова: экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), криососуд, стабилизация температурного поля, горловина, пробка, жидкий азот.

Введение

В последние десятилетия резко возросло использование криогенных температур и жидких криоагентов в ракетно-космической технике, энергетике, криомедицине, научных исследованиях и в других областях, что потребовало изготовления значительных количеств различных криостатов, криососудов и криоекостей с теплозащитой из слоев ЭВТИ, которая на калориметрах характеризуется наименьшими коэффициентами теплопроводности ($\lambda_{эф}$). Однако на криососудах данная теплозащита, смонтированная машинным ускоренным способом, оказалась низкосортной, так как имела в 11-13 раз более высокую теплопроводность $\lambda_{эф}$ в сравнении с их калориметрическими образцами. Причины данных различий для специалистов были непонятными.

Длительное время проблема улучшения характеристик криососудов и различных криоустройств не решалась (как в нашей стране, так и за рубежом) из-за отсутствия обоснованных экспериментальных методик и апробированных теоретических соотношений для исследования процессов, происходящих в теплозащите криососудов и разработки методов их совершенствования.

В связи с этим были впервые разработаны методики и изготовлены экспериментальные установки и исследованы с их помощью физические параметры и новые особенности двух- и трехмерных процессов теплопереноса в многоэлементных теплозащитных конструкциях с пакетами ЭВТИ на криососудах [1]. Это позволило выявить по ним параметры с целью оптимизации всех конструкций и технологий для совершенствования криососудов [2, 3].

В настоящее время появляются различные но-

вые изоляционные экранные и прокладочные материалы. Некоторые из них, вероятно, являются более эффективными, чем используемые в современных криоустройствах [3]. Поэтому, с целью дальнейшего совершенствования тепловых характеристик криоустройств необходимо регулярно проводить исследования новых таких материалов (их теплопроводность, адсорбционные, вакуумные, оптические, газодинамические и другие параметры), для выявления наиболее эффективных из них. При этом основная информация о новых материалах достигается при исследованиях их непосредственно на криососудах с жидким азотом (или другим криоагентом) в условиях стационарного теплового состояния. В соответствии с технологией производства каждый криососуд подлежит обязательным тепловым испытаниям. Для этого они заполняются жидким азотом на специальной испытательной площадке, где выдерживаются в течение 10 суток для стабилизации в них теплового состояния. После этого производится первое взвешивание криососудов с жидким азотом, а спустя двое суток – второе. В результате определяется средняя испаряемость жидкого азота из криососудов (m_c). Если полученная величина m_c не превышает 150 г/сутки, то изготовленный криососуд считается качественным и его отправляют потребителю. Разработка метода ускорения стабилизации теплового состояния в криососудах позволяет уменьшить производственные площади, на которых проводят испытания их с жидким азотом.

Цель работы - разработка способа ускорения процесса стабилизации температурного поля в криососуде с жидким азотом, что позволяет уменьшить производственные площади для проведения их тепловых испытаний.

Результаты исследования

Исследования проводились на криобиологических сосудах типа Х-34Б емкостью 35 л со стеклопластиковой горловиной диаметром 0,06 м, длиной 0,26 м (рис. 1).

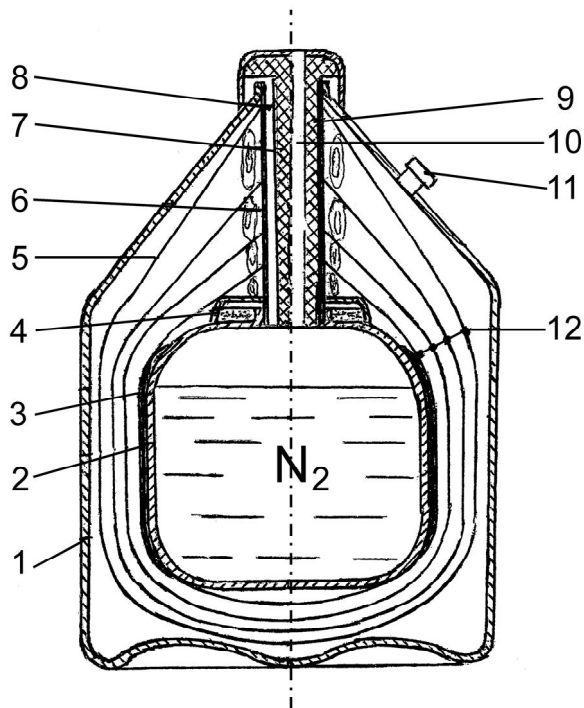


Рис. 1. Устройство криососуда: 1 – корпус; 2 – внутренний резервуар; 3 – адсорбционный насос; 4 – насыпной адсорбционный насос; 5 – слой экранно-вакуумной теплоизоляции; 6 – стеклопластиковая горловина; 7 – серийная полистироловая пробка; 8 – газовый зазор между горловиной и пробкой; 9 – плотная полистироловая пробка; 10 – центральное отверстие в плотной пробке; 11 – вакуумировочный штуцер; 12 – среднеинтегральная толщина пакета ЭВТИ с термопарами

После заполнения криососуда жидким азотом в его горловину вводится серийная полистироловая пробка 7, которая образует кольцевой зазор 8 толщиной $2,5 \cdot 10^{-3}$ м между внутренней поверхностью горловины и наружной поверхностью пробки для выхода испаряющегося азота. Процесс стабилизации теплового состояния в нем исследуется по изменению во времени (τ) массы (m) испаряющегося жидкого азота $m(\tau)$, определяемого с помощью электронных весов на экспериментальном стенде [4]. Полученные результаты для двух криососудов (№1 и №2) представлены на рис. 2.

Их анализ показывает, что через 80-100 часов после заполнения криососуда жидким азотом достигается наименьшая испаряемость из криососудов и зависимость $m(\tau)$ 1 и 2 проходят через минимум.

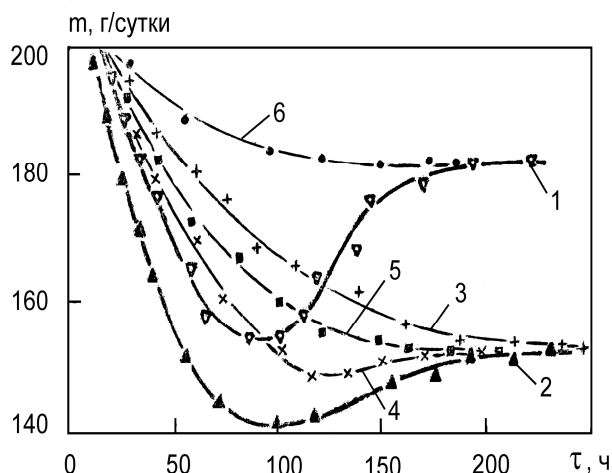


Рис. 2. Изменения величины испаряемости (m) жидкого азота из криососуда от времени охлаждения (τ): 1 – криососуд №1 с пакетом ЭВТИ теплопроводностью (λ_s) $11,7 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К); 2 – криососуд №2 с ЭВТИ теплопроводностью $9,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К); 3 – криососуд №2 с плотной пробкой; 4 – криососуд №2 сначала с плотной пробкой в горловине в течение 12 часов, а затем с серийной пробкой в горловине; 5, 6 – криососуды №2 и №1 сначала (в течение 21 часа) с плотной пробкой, а затем – с серийной, соответственно

Сделано предположение, что это связано с переохлаждением слоев ЭВТИ через горловину холодными парами азота во время интенсивного его испарения после заполнения первоначально "горячих" криососудов.

В дальнейшем, как следует из зависимостей $m(\tau)$ 1 и 2, испаряемость из криососудов увеличивается, что связано с уменьшением воздействия холодных паров азота на горловину, а также нагреванием переохлажденных слоев ЭВТИ. Через 180-210 часов испаряемость жидкого азота из криососудов становится практически неизменной, что свидетельствует об установлении в криососуде стационарного теплового состояния при определенной величине испарения (m_c) которая характеризует их тепловую эффективность.

Установившаяся в криососудах величина испаряемости жидкого азота m_c обуславливается суммарными теплопритоками (Q_c) в криососудах:

$$Q_c = m_c \cdot r, \quad (1)$$

где r – теплота испарения жидкого азота.

Определение в криососудах (после достижения стационарного теплового состояния) теплопритоков по горловине (Q_r), пробке (Q_p) и газовому зазору между горловиной и пробкой ($Q_{г.з.}$) по впервые разработанной методике [1] позволило рассчитать тепловые потоки через теплоизоляцию ($Q_{и.}$), а также коэффициенты теплопроводности ($\lambda_{эф}$) по следующим соотношениям:

$$Q_{И} = Q_{С} - Q_{Г} - Q_{П} - Q_{Г.З.} \quad (2)$$

и

$$\lambda_{ЭФ} = \frac{Q_{И} \cdot \delta_{И}}{F_{С} \cdot \Delta T}, \quad (3)$$

где $\delta_{И}$ – среднеинтегральная толщина пакета ЭВТИ на криососуде по всей поверхности (0,071 м); $F_{С}$ – средняя поверхность слоев теплоизоляции на криососуде (0,86 м²); ΔT – перепад температуры между наружной и внутренней поверхностью криососуда (219 К).

После определения характеристик пакетов ЭВТИ для опытных криососудов №1 и №2 стало возможным провести сравнение полученных экспериментальных значений времени достижения теплового равновесия ($\tau_{Э}$) в криососудах с аналогичными теоретическими ($\tau_{Т}$) величинами, рассчитанными по предложенному в [5] уравнению:

$$\tau_{Т} = \lambda_{ЭФ} \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T^2 / [2(Q_{И} / F_{С})^2]. \quad (4)$$

Данный расчет проведен для опытных криососудов №1 и №2, для которых значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_{ЭФ}$ составили $11,7 \cdot 10^{-5}$ и $9,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) (рассчитанные по уравнению (3)), тепловые потоки $Q_{И}$ через их пакеты ЭВТИ составляли 0,301 и 0,245 Вт (определенные по соотношению (1)), удельная теплоемкость $c = 0,85$ кДж/кг, плотность слоев в пакете ЭВТИ $\rho = 35$ кг/м³. Полученное при таком расчете теоретическое время $\tau_{Т}$ для криососудов №1 (189 часов) и для №2 (225 часов) согласуется (с точностью 8-10 %) с экспериментальными значениями. Из полученных результатов следует, что для более эффективного криососуда №2 (с меньшей теплопроводностью $\lambda_{ЭФ}$ пакета ЭВТИ) стационарное тепловое равновесие достигается за более продолжительное (на 25-35 часов) время.

Далее описаны исследования, подтверждающие сделанные выше предположения, что прохождение через минимум зависимостей $m(\tau)$ 1 и 2 обусловлено переохлаждением слоев ЭВТИ парами азота через стенку горловины во время начального его интенсивного испарения после заполнения "горячего" криососуда. Для этого после заполнения криососуда жидким азотом в его горловину 6 (рис. 1) вставлялась плотная полистироловая пробка 9 (без зазора с горловиной) с центральным отверстием 10 (диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ м) для вывода из него паров криоагента. Кинетика изменения испаряемости азота из криососуда №2 с данной пробкой представлены на рис. 2 зависимостью $m(\tau)$ 3. Из нее следует, что в таком криососуде стационарное тепловое состояние устанавливается за более длительное время (270 часов). Это на 60 часов дольше в сравнении с данным криососудом, в котором испарявшиеся пары азота охла-

ждали его горловину (кривая $m(\tau)$ 2). При этом, зависимость $m(\tau)$ 3 не проходит через минимум. Аналогичные результаты получены и для криососуда №2 (не представленные на рис. 2). Для него увеличение времени стабилизации составило ~35 часов.

Таким образом, экспериментально установлено, что прохождение через минимум зависимостей $m(\tau)$ 1 и 2 для криососудов обусловлено переохлаждением их пакетов ЭВТИ парами азота при их интенсивном испарении.

Далее были исследованы другие варианты процесса стабилизации температурного поля в криососудах. Так, в случае использования в горловине криососуда (после заполнения жидким азотом) плотной пробки 9 в течение 12 часов, а затем вместо нее в горловину вставить серийную пробку 7, то стабилизация теплового состояния в криососуде №2 будет характеризоваться зависимостью $m(\tau)$ 4. Она также проходит через минимум, но менее резко в сравнении с кривой $m(\tau)$ 2. При этом стабилизация теплового состояния достигается за ~190 часов, что на 20 часов меньше в сравнении с криососудом, в котором горловина охлаждалась парами азота в течение всего времени стабилизации (зависимость $m(\tau)$ 2).

Исследованы и другие режимы стабилизации температурного поля в криососудах путем варьирования продолжительности и различной последовательности использования плотной и серийной пробок в горловине. Наиболее рациональным оказалось применение в криососуде после заполнения его жидким азотом сначала плотной пробки в течение 21 часов, а затем серийной пробки. В данном случае в криососуде №2 стационарное тепловое состояние устанавливалось на 50 часов быстрее (зависимость $m(\tau)$ 5) в сравнении с таким процессом с использованием серийной пробки (кривая $m(\tau)$ 2). Для криососуда №1 при данной технологии стационарное тепловое поле достигается на ~40 часов быстрее (зависимость $m(\tau)$ 6) в сравнении с процессом с серийной пробкой (кривая $m(\tau)$ 1). Ускорение на 40-50 часов стабилизации теплового состояния в криососудах позволило сократить на ~20 % производственные площади для проведения их испытаний с жидким азотом.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что причиной длительности процесса стабилизации температурного поля в криососудах является низкая теплопроводность их пакетов ЭВТИ, а также переохлаждение холодными парами азота после заполнения в "горячий" криососуд в начальный период (в течение 21 часа). Разра-

ботана оптимальная технология с использованием плотной и серийной пробки в горловине криососудов во время его охлаждения, позволившая сократить на 40-50 часов время стабилизации теплового состояния для проведения последующих исследований различных характеристик новых изоляционных материалов в пакетах ЭВТИ. Это также позволяет сократить на ~20 % производственные площади для проведения тепловых испытаний изготовленных криососудов.

Литература

1. Жунь, Г.Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов "Харьков-34Б" [Текст] / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.И. Шалаев // Криогенные системы: разработка и использование. – К: Наук. думка. – 1984. – С. 35-42.

2. Жунь, Г.Г. Оптимизация теплозащиты криососуда [Текст] / Г.Г. Жунь // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №5 (41). – С. 43-50.

3. Жунь, Г.Г. Разработка высокоэффективной комбинированной композиции ЭВТИ [Текст] / Г.Г. Жунь // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 106. – С. 75-79.

4. Жунь, Г.Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками [Текст] / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.И. Шалаев // Межвузовский сборник научных трудов: Процессы и аппараты криогенной техники и кондиционирования воздуха. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С. 55-64.

5. Каганер, М.Г. Теплообмен в низкотемпературных конструкциях [Текст] / М.Г. Каганер. – М.: Энергия, 1979. – 257 с.

Поступила в редакцию 2.03.2012

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник В.И. Шнырков, Физико-технический институт низких температур НАНУ, Харьков, Украина.

ПРИСКОРЕННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В КРІОПОСУДІ

Г.Г. Жунь

Запропонований засіб прискорення на 40-50 годин процесу стабілізації температурного поля в кріопосуді з теплозахистом із пакетів ЕВТІ після заповнення його рідким азотом, що дозволяє зменшити на ~20 % виробничі площі для їх теплових випробувань. З цією метою в їх горловинах необхідно використати спочатку на протязі 21 години щільну полістиролову пробку з центральним отвором, яка ізолює холодні пари азоту від її стінок і перешкоджає переохолодженню шарів ЕВТІ. Потім вгорловині кріопосуду потрібно застосувати серійну полістиролову пробку, яка має з нею зазор, що забезпечує охолодження її виходячими парами кріогену.

Ключові слова: екрано-вакуумна теплоізоляція (ЕВТІ), кріопосуд, стабілізація температурного поля, горловина, пробка, рідкий азот.

ACCELERATION OF STABILIZATION OF TEMPERATURE FIELD IN A CRYOVESSEL

G.G. Zhun'

A technique is proposed to accelerate, by 40-50 hours, the process of stabilization of temperature field in cryovessels with thermal superinsulation packet heat shielding after filling them with liquid nitrogen. This allows to reduce working area for thermal tests by ~20 %. For this sake, the neck is plugged toughly for 21 hours with an polystyrene insert having central channel to let cold nitrogen vapor out in order to isolate the walls and prevent undercooling of the thermal superinsulation layers. After this, common commercial polystyrene plug should be used with a spacing between it and the neck for venting the cold nitrogen vapor that provides good cooling the neck.

Key words: thermal superinsulation, cryovessel, stabilization of temperature field, neck, plug, liquid nitrogen.

Жунь Георгий Григорьевич – д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры технической криофизики, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: zhun2010@rambler.ru.