

УДК 536.21: 536.48

Г.Г. ЖУНЬ

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ КРИОСОСУДА

В работе приведены результаты исследования тепловых характеристик криососудов, в которых при длительном хранении жидкого азота происходит ухудшение (на ~40 %) тепловых параметров. Установлено, что причиной этого является увеличение в теплозащитной экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) лучистой составляющей теплопереноса от повышения в 15-20 раз их степени черноты в результате образовавшихся на холодных участках слоев криоконденсата из продуктов газоотделения. Разработана новая конструкция пакета ЭВТИ для криососудов с наружными перфорированными слоями, что позволило устранить образование криосадков в ЭВТИ и увеличить ресурс работы с жидким азотом в ~1,4 раза.

Ключевые слова: экранно-вакуумная теплоизоляция, криососуд, теплозащита, теплопроводность, перфорация, продукты газоотделения, степень черноты.

Введение

Потребности ракетно-космического комплекса, энергетики, криомедицины, животноводства и других отраслей в огромных количествах жидкого гелия, водорода и азота потребовали разработки и организации производства различных криоёмкостей, криососудов и криостатов для их транспортирования, хранения и применения с минимальными потерями. Однако, использование в данном криогенном оборудовании наиболее эффективной криогенной теплозащиты из слоев экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) оказалось неудачным (как в нашей стране, так и за рубежом), так как достигаемая для них эффективная теплопроводность ($\lambda_{эф}$) была в 11-13 раз большей за их калориметрические значения. Причины этого для специалистов были непонятными.

Нами сделано предположение, что одним из факторов ухудшения тепловых характеристик теплоизоляции на различных криоустройствах могут быть слои криоконденсата, образующиеся из откачиваемых продуктов газоотделения материалов теплозащиты в процессе их многолетней эксплуатации. Слои криоконденсата могут повышать степень черноты слоев ЭВТИ и, тем самым, увеличивать лучистую составляющую ($\lambda_{л}$) эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ теплоизоляции.

Целью работы является исследование особенностей процесса вакуумирования продуктов газоотделения в теплозащитном пакете ЭВТИ криососуда во время его эксплуатации с жидким азотом. В случае подтверждения факта образования в теплозащитном пакете ЭВТИ слоев криоконденсата и их

ухудшающего воздействия на тепловые характеристики, следовало разработать его новую конструкцию для криососуда, исключаящую возникновение криоконденсата.

Результаты исследования

Исследования проводились на экспериментальном стенде [1] с опытными криососудами, в теплозащите которых по среднеинтегральной их толщине (равной ~0,08 м) были смонтированы датчики температуры (термопары). Для исследуемых криососудов определялись суммарные теплопритоки, а также составляющие эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$. Все криососуды изготавливались по одинаковой технологии с достижением в их теплозащитных пакетах ЭВТИ (из слоев ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7) оптимального вакуума $P_0 \leq 10^{-3}$ Па, исключаяющего в них молекулярную проводимость ($\lambda_{м}$). Кроме того, контактно-кондуктивная теплопроводность ($\lambda_{к.к.}$) в них была также одинаковой. Из этого следовало, что эффективная теплопроводность $\lambda_{эф}(T)$ для пакетов ЭВТИ на исследуемых криососудах обуславливается только лучистой $\lambda_{л}(T)$ и контактно-кондуктивной $\lambda_{к.к.}(T)$ составляющими, согласно соотношения:

$$\lambda_{эф}(T) = \lambda_{л}(T) + \lambda_{к.к.}(T). \quad (1)$$

Эффективную теплопроводность для пакета ЭВТИ опытного криососуда №1 определяли по разработанной методике [2], согласно которой измеренный температурный профиль по его среднеинтегральной толщине $T(x/\delta)$ 1 (представленный на рис. 1) разбивали на элементарные участки $\Delta\delta$ [3]. Тогда

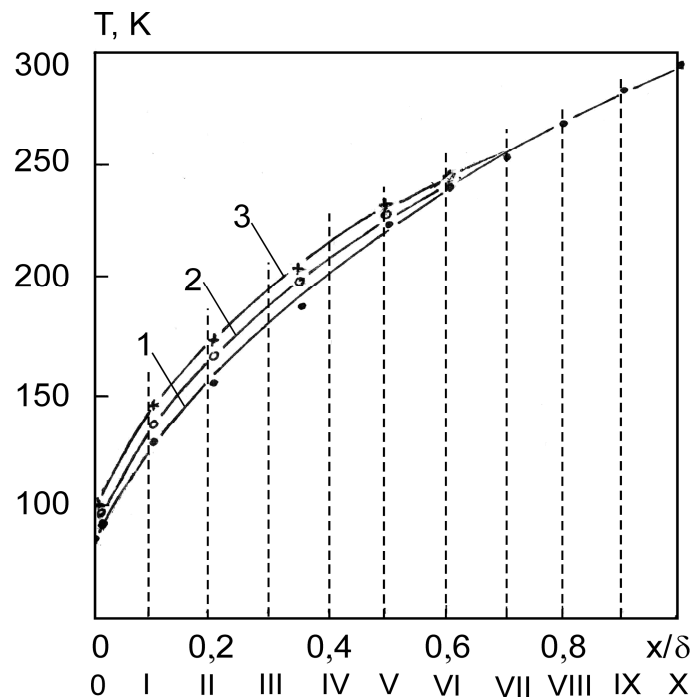


Рис. 1. Распределение температуры (Т) по среднеинтегральной приведенной толщине (x/δ) пакетов ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7 на опытных криососудах при граничных температурах 78-297 К: 1, 2, 3 – криососуды №1, №2 и №3, соответственно; 1-Х – условная разбивка температурных профилей $T(x/\delta)$ 1, 2, 3 штриховыми линиями на элементарные участки толщиной $\Delta\delta$.

эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ (Т) для любого i -го участка определяется из уравнения Фурье:

$$\lambda_{\text{эф}}(T) = q \cdot \Delta\delta / \Delta T. \quad (2)$$

В рассматриваемых сечениях ЭВТИ со среднеинтегральной толщиной удельный тепловой поток q также равен его среднему значению для криососуда. При использовании уравнения (2) учитывалось также увеличение поперечного теплового потока от теплой стенки к холодной (до двух раз), обусловленное частичным его отводом вдоль слоев ЭВТИ к горловине и через нее к парам криоагента. Погрешность определения коэффициента $\lambda_{\text{эф}}$ составляла 9-13 %. Температурные зависимости $\lambda_{\text{эф}}$ (Т) для пакета ЭВТИ опытного криососуда №1 после установления теплового равновесия (через 10 суток), а также через 0,5 и одного года хранения в нем жидкого азота представлены на рис. 2 зависимостями $\lambda_{\text{эф}}$ (Т) 1, 3 и 5, соответственно.

Лучистая проводимость для теплозащитных пакетов ЭВТИ криососудов определялась из их температурных профилей $T(x/\delta)$ 1, 2 и 3 (рис. 1) по уравнению [4]:

$$\lambda_{\text{л}}(T) = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon} \cdot \frac{\delta}{N} \cdot \sigma \cdot T_{\text{ср}}^3, \quad (3)$$

где ε – степень черноты экранов при средней температуре ($T_{\text{ср}}$) для элементарных участков $\Delta\delta$ тепло-

изоляции принималась из зависимости $\varepsilon(T)$ 1 [5] (представленной на рис. 3); N – число слоев в пакете ЭВТИ; σ – постоянная Стефана-Больцмана. Рассчитанные таким способом зависимости $\lambda_{\text{л}}$ (Т) 2, 4 и 6 представлены на рис. 2.

Контактно-кондуктивная теплопроводность $\lambda_{\text{к.к.}}$ (Т) для ЭВТИ опытных криососудов была (как отмечалось выше) одинаковой и рассчитывалась по соотношению (1). Ее зависимость $\lambda_{\text{к.к.}}$ (Т) 7 представлена на рис. 2.

Опытный криососуд №1 после заполнения жидким азотом и установления теплового равновесия (через 10 суток) характеризовался суммарными теплопритоками $Q_c = 0,279$ Вт и ресурсом работы (R) (при разовом заполнении жидким азотом), равным 232 суткам (см. таблицу).

Через 0,5 года хранения жидкого азота в данном криососуде его тепловые характеристики ухудшились, так как суммарные теплопритоки в нем увеличились до 0,33 Вт (на ~18 %). Анализ измеренного для данной теплоизоляции температурного профиля $T(x/\delta)$ 2 (рис. 1) показал, что за это время произошло повышение температуры (на 8-11 К) на ее участках ниже 240-250 К. Увеличилась также эффективная теплопроводность пакетов ЭВТИ (зависимость $\lambda_{\text{эф}}$ (Т) 3 на рис. 2). При этом давление в изоляционной полости криососуда оказалось неизменным (равным оптимальному значению P_0), что свидетельствует об отсутствии переноса тепла по молекулярной составляющей.

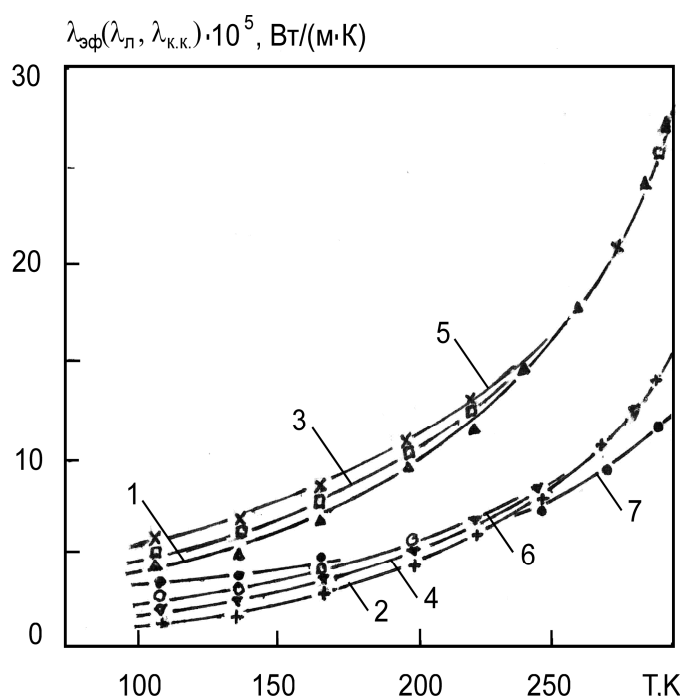


Рис. 2. Изменение с температурой (T) эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф}$) и ее составляющих (λ_l и $\lambda_{к.к.}$) для пакета ЭВТИ криососуда №1: 1, 3, 5 – зависимости $\lambda_{эф}(T)$ после хранения в криососуде жидкого азота в течение 10 суток, 0,5 и одного года, соответственно; 2, 4, 6 – зависимости $\lambda_l(T)$ после аналогичных сроков хранения жидкого криоагента; 7 – зависимость $\lambda_{к.к.}(T)$, являющаяся одинаковой для всех теплоизоляций.

Таблица
Тепловые характеристики криососудов X-34Б (емкостью 35 л) с теплозащитой из слоев ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7 после хранения в них жидкого азота в течение (τ) 10 суток (1), 0,5 года (2) и одного года (3)

№ криососуда	Характеристика слоев на криососуде	1 ($\tau=10$ суток)		2 ($\tau=0,5$ года)		3 ($\tau=1$ год)	
		Q_c , Вт	R , суток	Q_c , Вт	R , суток	Q_c , Вт	R , суток
1	Не перфорированные	0,279	232	0,330	196	0,388	161
2	Перфорированные на 20 %	0,287	239	0,319	215	0,356	193
3	Перфорированные на 28 %	0,290	241	0,307	227	0,328	214
4	Перфорированные на 35 %	0,298	244	0,297	240	0,295	242

Поскольку в течение 0,5 года исследований криососуд №1 с жидким азотом не подвергался каким-либо динамическим, вибрационным или другим воздействиям, то за это время контактно-кондуктивная составляющая теплопереноса $\lambda_{к.к.}(T)$ 7 осталась неизменной.

Из проведенного анализа следовало, что ухудшение тепловых характеристик криососуда №1 могло произойти за счет увеличения лучистой составляющей теплопроводности $\lambda_l(T)$ в его теплозащите. В связи с этим, используя найденные зависимости $\lambda_{эф}(T)$ 3 и $\lambda_{к.к.}(T)$ 7 по уравнению (1) была определена новая увеличенная лучистая проводимость $\lambda_l(T)$ 4, а также происшедший ее прирост $\Delta\lambda_l(T)$, который мог осуществиться вследствие повышения степени черноты $\varepsilon(T)$ экранов в пакете ЭВТИ. Последняя характеристика $\lambda_l(T)$ позволила оценить по уравне-

нию (3) увеличение в 7-9 раз степени черноты слоев теплоизоляции в криососуде (зависимость $\varepsilon(T)$ 2 на рис. 3).

Через год хранения в криососуде №1 жидкого азота суммарный теплоперенос в нем вырос уже до 0,388 Вт (на ~39 %). Использование измеренного для данной теплоизоляции температурного профиля $T(x/\delta)$ 3 (рис. 3) позволило по описанной выше методике определить возрастание для нее теплопроводности $\lambda_{эф}(T)$ 5, а также лучистой составляющей $\lambda_l(T)$ 6 в результате увеличения в 15-20 раз ее степени черноты.

Сделано предположение, что ухудшение тепловых характеристик криососуда №1 при длительной его работе с жидким азотом произошло от увеличения степени черноты их экранов ЭВТИ в результате

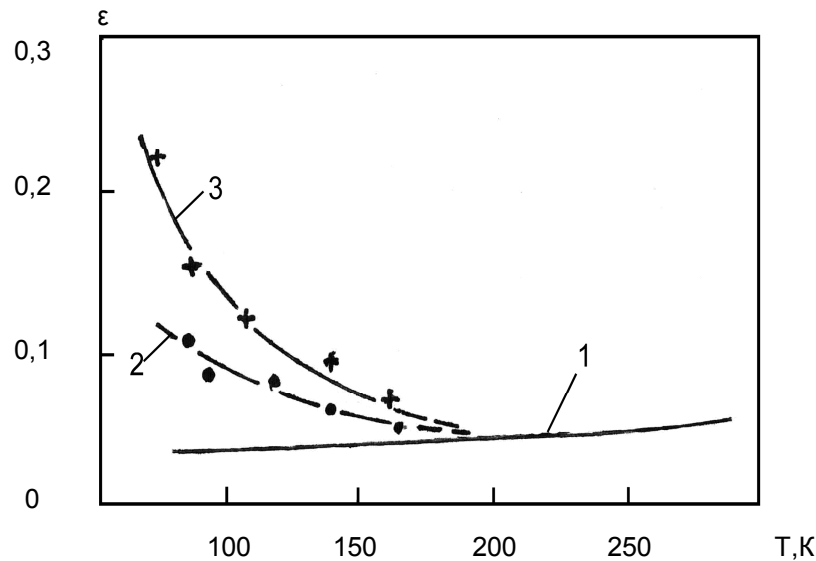


Рис. 3. Температурная зависимость степени черноты слоев в ЭВТИ (ϵ): 1 – калориметрические данные; 2, 3 – после хранения жидкого азота в криососуде в течение 0,5 года и одного года, соответственно.

образования в них слоев криоконденсата на холодных участках из откачиваемых вакуумным адсорбционным насосом продуктов газоотделения.

В связи с этим необходимо было разработать новую конструкцию теплозащитного пакета ЭВТИ для криососуда, в котором продукты газоотделения не откачивались бы через его холодные слои.

Проведенные нами исследования газопроницаемости отдельных участков теплозащитного пакета ЭВТИ на криососуде позволило установить, что вдоль его горловины (с пористой структурой из примыкающих к ней торцов ЭВТИ и подмоточного жгута из стекловуали ЭВТИ-7) существует своеобразный канал (вакуумопровод), который характеризуется наибольшей газопроницаемостью (до 65-70 %) от суммарной характеристики для всего пакета ЭВТИ [6]. Возникла идея использовать данный пористый канал возле горловины для откачки через него вакуумным адсорбционным насосом продуктов газоотделения из наружных теплых слоев пакета ЭВТИ, увеличив их газопроницаемость перфорацией. Для этого следовало определить оптимальное количество слоев теплоизоляции в криососуде, которое необходимо было перфорировать. Результаты данных исследований представлены в таблице.

Их анализ показывает, что в случае перфорации в криососуде №2 до 20 % наружных слоев ЭВТИ суммарный теплоперенос Q_c увеличивается на ~3 % от повышения лучистой теплопроводности через отверстия перфорации. Через 0,5 года хранения в данном криососуде жидкого азота теплопритоки Q_c увеличились до 0,319 Вт (на 11 %), а спустя год – до 0,356 Вт (на 24 %). Полученные результаты показали, что ухудшение тепловых характеристик

стало меньшим (на 20 %) в сравнении с криососудом №1.

Для криососуда №3 (с перфорацией его теплозащитных слоев на 28 %) через год хранения жидкого азота суммарный теплоприток увеличился только на 13 %. Постепенно увеличивая степень перфорации теплоизоляции нами установлено, что оптимальным является перфорация до 35 % их теплых слоев (криососуд №4). При этом лучистый теплоперенос через отверстия перфорации увеличивается на ~5 %. Через год хранения в сосуде №4 жидкого азота его тепловые характеристики остались (в пределах погрешности) неизменными (таблица). В результате ресурс работы криососуда увеличился до 242 суток, в ~1,4 раза в сравнении с криососудом №1 с теплозащитным пакетом ЭВТИ без перфорированных слоев.

Заключение

Проведенные исследования изготовленных криососудов позволили установить, что при длительном хранении жидкого азота их тепловые характеристики значительно ухудшаются. Анализ составляющих эффективной теплопроводности для теплозащитных слоев ЭВТИ данных криососудов показал, что причиной этого является увеличение лучистой проводимости от повышения в десятки раз их степени черноты. Установлено, что причиной этого является образование слоев криоконденсата из откачиваемых продуктов газоотделения на участках теплоизоляции с температурой ниже ~200 К.

Для устранения данного ухудшающего фактора предложена новая конструкция теплозащитного па-

кета ЭВТИ для криососудов с перфорированными (до 35 %) слоями возле их теплой стенки. Данная конструкция позволила изменить направление движения потока выделяющихся продуктов газоотделения: сначала к теплой стенке криососуда, а затем через пористый канал высокой проводимости вдоль горловины к вакуумному адсорбционному насосу, смонтированному на холодной стенке внутреннего резервуара. В результате устраняется образование в теплозащитных ЭВТИ слоев криоконденсата, что способствует, только в течение одного года, увеличить в ~1,4 раза ресурс работы криососуда с жидким азотом.

Литература

1. Жунь, Г.Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов "Харьков-34-Б" [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. О влиянии условий вакуумирования теплоизоляции на ресурс работы криососуда [Текст] / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.А. Мирош-

ниченко // Межвузовский сборн. научн. трудов. Исследование теплофизических свойств рабочих тел и процессов криогенной техники и кондиционирования воздуха. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1987. – С. 39-45.

3. Эффективность "безэкранный" метода использования холода паров в криососудах с широкой горловиной [Текст] / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т. 54, №4. – С. 600-607.

4. Воробьева, Г.И. Процессы теплопереноса в экранно-вакуумной теплоизоляции [Текст] / Г.И. Воробьева, В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко // (Препринт ФТИНТ АН УССР, №48-86). – Харьков, 1986. – 39 с.

5. Першин, Н.П. Исследование теплофизических характеристик и теплопереноса в криогенных слоисто-вакуумных изоляциях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Першин; Харьков. – 1979. – 20 с.

6. Жунь, Г.Г. Исследование пропускной способности экранно-вакуумных изоляций [Текст] / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування. – 1988. – №154 (121). – С. 20-28.

Поступила в редакцию: 05.04.2012

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

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕПЛОЗАХИСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КРІОСОСУДУ

Г.Г. Жунь

В роботі наведені результати дослідження теплових характеристик криососудів, в яких при тривалому зберіганні рідкого азоту відбувається погіршення (на ~40 %) теплових параметрів. Встановлено, що причиною цього являється збільшення в їх теплозахисній екранно-вакуумній теплоізоляції (ЕВТИ) променевої складової теплопереносу від підвищення в 15-20 разів їх ступеню чорноти за рахунок утворення на холодних ділянках шарів криоконденсату з відкачуємих продуктів газівідділення. Розроблена нова конструкція пакету ЕВТИ для криососудів з зовнішніми перфорованими шарами, що дозволило усунути утворення криоконденсату в ЕВТИ та збільшити ресурс роботи з рідким азотом в ~1,4 рази.

Ключові слова: екранно-вакуумна теплоізоляція; криососуд; теплозахист; теплопровідність, перфорація; продукти газівідділення; ступінь чорноти.

DEVELOPMENT OF THE ADVANCED HEAT-SHIELDING DESIGN OF KRIOSOSUD

G.G. Zhun'

The paper reports results of a study of thermal characteristics of cryovessels, in which degradation (by ~40%) of the thermal parameters occur during long-term storage of liquid nitrogen. The cause for this was found to be an increase of the radiation component of heat transfer in the heat shielding superinsulation. The rise of the radiation heat transfer is due to increase, by 15-20 times, of emissivity factor because of formation of condensate in cold layer areas from the gassing products being pumped out. A new design of the superinsulation packet for cryovessels has been developed with perforated outer layers that prevented formation of the cryocondensate in the superinsulation and prolonged the time of operation with liquid nitrogen as a factor of ~1.4.

Key words: thermal insulation, cryovessel, heat shielding, thermal conductivity, perforation, gassing products, emissivity factor.

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