

УДК 536.21: 536.48

Г.Г. ЖУНЬ

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина

ВЫЯВЛЕНИЕ И УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В КРИОСОСУДАХ

В работе приведены результаты исследований двух- и трехмерных процессов тепломассопереноса в теплозащите криососудов из полос экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ). Установлено, что причинами увеличения ее теплопроводности на криососудах в сравнении с их калориметрическими образцами является образование в них различных дефектов. Определены значения для установленного комплекса из 11 параметров, улучшающих конструкции и технологии для проектирования и изготовления криососудов с теплозащитой из пакетов ЭВТИ без дефектов, теплопроводность которых лишь на 24-27 % превышает калориметрические значения. Изготовленные криососуды с данной теплозащитой имеют ресурс работы при разовом заполнении, превышающий лучшие зарубежные аналоги.

Ключевые слова: экранно-вакуумная теплоизоляция, криососуд, теплозащита, теплопроводность, калориметр, тепломассоперенос.

Введение

Основным резервом повышения ресурса работы современных криососудов, криоёмкостей и криостатов (широко используемых в ракетно-космической технике, энергетике, животноводстве, научных исследованиях и других областях) является совершенствование используемой в них экранно-вакуумной теплоизоляции. Первоначальное использование теплозащитных полос экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) на различных криоустройствах (монтируемых машинным ускоренным орбитальным способом по научно необоснованным технологиям) оказалось неудачным (как в нашей стране, так и за рубежом), поскольку достигаемые для них теплопроводности ($\lambda_{эф}$) были во много раз выше данных параметров для их калориметрических образцов. Длительное время причины данных различий не были понятными для специалистов, поэтому теплозащита из ЭВТИ на криососудах не совершенствовалась.

Цель работы – разработка методов и исследование процессов тепломассопереноса в многоэлементной теплозащитной конструкции с пакетами ЭВТИ на криоустройствах для выявления различных дефектов, ухудшающих тепловые характеристики, а также разработка конструкций и технологий их устранения.

Результаты исследования

С целью отбора наиболее перспективных материалов вначале проводятся испытания образцов ЭВТИ на плоском калориметре (рис. 1) для определения их коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$ в диапазоне температур 78-300 К. При этом тепловой поток определяется в стационарном режиме по тепловой мощности, подводимой к контрольному нагревателю. В исследуемых ЭВТИ в качестве экрана используется алюминизированная полиэтилен-рефталатная пленка ПЭТФ-ДА толщиной 5-12 мкм, а также прокладки из различных материалов.

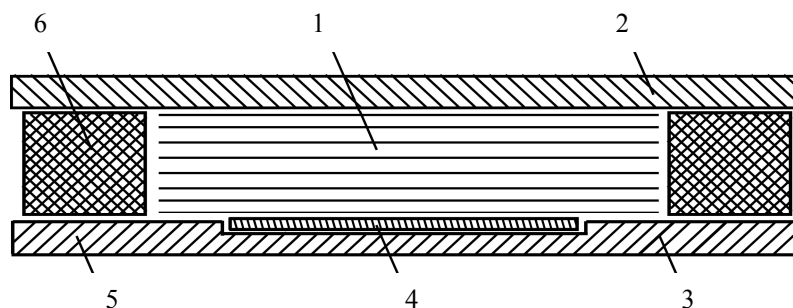


Рис. 1. Принципиальная схема калориметра для определения теплопроводности плоских образцов ЭВТИ: 1 – исследуемый образец ЭВТИ; 2 – холодная стенка (77,4 К); 3 – теплая стенка (300 К); 4 – контрольный нагреватель; 5 – компенсирующий нагреватель; 6 – охранный экран

Исследования особенностей процесса тепло-массопереноса в пакетах ЭВТИ, смонтированных машинным способом на криососудах, проводятся на экспериментальном стенде [2].

Первая отечественная композиция ЭВТИ состояла из пленки ПЭТФ-ДА и прокладочной стекловуали ЭВТИ-7, изготовленной из стеклянных волокон, которые скрепляются между собой клеевой эмульсией из ПВА. На плоском калориметре непрогрываемые образцы данной ЭВТИ характеризуются низкой теплопроводностью $\lambda_{эф}$, составляющей $3,1 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) (табл. 1).

В начале изоляционные полосы из ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7 шириной 70-100 мм монтировались на криососуды машинным эмпирическим методом. Затем они (согласно технологического регламента) помещаются в специальные электропечи для осуществления термовакuumной дегазации их изоляционных полостей (вакуумирование с одновременным нагревом) при температуре 370-390 К в течение 7-10 суток. При этом, кроме температуры в электропечах и давления в общем коллекторе вакуумирования, другие параметры не определялись. Изготовленная таким образом на криососудах теплозащита имела теплопроводность $(34-40) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), которая превышала значения аналогичного параметра для калориметрического образца в 11-13 раз (см. табл. 1). Из данных результатов следовала важная задача – необходимость выявления дефектов, которые обуславливают ухудшение теплозащиты из пакетов ЭВТИ на криососудах, а также разработки способов их устранения.

С этой целью партия данных малоэффективных криососудов после тепловых испытаний с жидким азотом демонтировалась для исследования состояния их теплозащитных слоев ЭВТИ. В результате

было установлено, что смонтированная на криососудах теплоизоляция в процессе термовакuumной дегазации превращалась в сплошную рыхлую массу. Проведенные исследования позволили выявить причину этого. Оказалось, что во время нагрева криососудов в электропечах при температуре ~ 360 К клеевая основа в прокладочной стекловуали размягчается и происходит склеивание слоев в пакете ЭВТИ. Это обуславливает резкое увеличение их плотности (ρ) и теплопереноса по материалу теплоизоляции [3]. Кроме того, происходит ухудшение условий вакуумирования пакетов ЭВТИ, что препятствует достижению в них оптимального вакуума ($P_0 \leq 10^{-3}$ Па) и способствует повышению теплопереноса по газу [4].

Анализ теплоизоляции возле горловины криососудов позволил установить, что между торцами смонтированных полос ЭВТИ и поверхностью образуются щели в результате недостаточного их прижатия при монтаже. Это обуславливает увеличение лучистого теплопереноса вдоль горловины.

Послойный демонтаж пакета ЭВТИ выявил значительную запыленность его слоев вдоль внутреннего резервуара угольной пылью из адсорбционного вакуумного насоса. В результате значительно увеличивается степень черноты данной теплоизоляции, что способствует возрастанию лучистого теплопереноса в слоях ЭВТИ.

Проведенное исследование технологии машинного изолирования криососудов дало возможность установить значительную электризацию полос пленки ПЭТФ-ДА при их сматывании из плотного мотка (бобины). Образующиеся заряды статического электричества на поверхности пленки обуславливают притяжение потока пыли из окружающей запыленной среды цеха, а также повышенное ее уп-

Таблица 1

Тепловые характеристики различных пакетов ЭВТИ на калориметре и криососуде в интервале 78-300 К

№№ п/п	Исследуемый прокладочный материал ЭВТИ	Предел прочности прокладки на растяжение σ_{p_2} кг/мм ²	Теплопроводность пакетов ЭВТИ с пленкой ПЭТФ-ДА толщиной 5 мкм и различными прокладками, $\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт/(м·К)		
			На плоском калориметре	Для исходного пакета ЭВТИ на криососуде	Для нового пакета ЭВТИ на криососуде
1	ЭВТИ-7 в состоянии поставки	0,35	3,1	34-40	13-13,7
2	ЭВТИ-7 после предварительной термовакuumной дегазации	-	-	22-25	8,8-9,3
3	СНТ-10	0,37	3,5	14-17,5	4,5-4,8
4	УСНТ-10	0,33	3,4	12-15	4,0-4,3
5	НТ-10	0,1	3,0	15-18	3,8-4,2
6	АНТ-10	0,09	2,9	14,5-17	3,6-3,7
7	УНТ-10	0,08	3,3	16,5-20	4,0-4,4

лотнение с прокладочной ЭВТИ-7. Указанные дефекты способствуют увеличению лучистого и контактно-кондуктивного теплопереноса в пакете ЭВТИ.

В связи с этим предложен метод улучшения характеристик прокладочной стекловуали ЭВТИ-7, состоящий в ее предварительной (перед использованием в пакете ЭВТИ) термовакуумной дегазации в отдельной камере при температуре 380-390 К. В результате ЭВТИ-7 из бесцветной становится желто-кремовой, что свидетельствует об ухудшении ее оптических характеристик. Пакет теплоизоляции с данной прокладкой не склеивается, но его теплопроводность $\lambda_{\text{эф}}$ (равная $(22-25) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К)) еще значительно превышает (в 7-8 раз) калориметрическую характеристику (см. табл. 1).

Выявленные недостатки отечественной прокладки на основе стекловуали ЭВТИ-7 стимулировали работы по созданию новых более эффективных материалов. Методом инфракрасной спектроскопии было установлено, что материалы с минимальным отношением коэффициента поглощения излучения к коэффициенту его отражения являются наиболее перспективными для пакетов ЭВТИ [5]. По этому критерию наилучшими такими материалами являются целлюлозные (Ц), лавсановые (Л), базальтовые (Б), вязкозные (В) и хлопковые (Х) волокна.

Из данных волокон по бумагоделательной технологии "мокрым" способом были изготовлены композиционные прокладочные бумаги СНТ-10 из смеси 70%Ц+30%Л, УСНТ-10 из 65%Ц+30%Л+5% углеродных (У) волокон и другие. Бумаги СНТ-10 и УСНТ-10 оказались прочными, что позволяло использовать их в машинной технологии изолирования криососудов пакетами ЭВТИ. Смонтированные с ними пакеты ЭВТИ на криососудах по аналогичной исходной технологии характеризовались меньшими коэффициентами теплопроводности $(12-17) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К). Но и они значительно превышали (в 3,5-4,5 раза) их калориметрические величины (см. табл. 1).

Новые прокладочные композиционные бумаги типа НТ-10, АНТ-10 и УНТ-10, изготовленные с использованием базальтовых, ацетохлориновых и целлюлозных волокон оказались малопрочными (с $\sigma < 0,30$ кг/мм²). Поэтому при машинном изолировании они часто обрываются. В результате теплопроводность пакетов ЭВТИ с данными прокладками составляет $(15-20) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), что в 5-6 раз выше их калориметрических характеристик.

Проведенные таким образом исследования позволили установить, что причиной ухудшения тепловых характеристик пакетов ЭВТИ, смонтированных на криососудах по эмпирической технологии является образование 13 дефектов, которые систе-

матизированы на рис. 2. Они обуславливают увеличение эффективной теплопроводности ($\Delta\lambda_{\text{эф}}$) данной теплоизоляции со стекловуалью ЭВТИ-7 в 11-13 раз, а с новыми композиционными прокладками – в 3,5-6 раз от повышения молекулярной ($\Delta\lambda_{\text{м}}$), лучистой ($\Delta\lambda_{\text{л}}$) и контактно-кондуктивной ($\Delta\lambda_{\text{к.к.}}$) составляющих и в результате образования новой лучисто-контактно-кондуктивной проводимости ($\lambda_{\text{л.к.к.}}$) согласно соотношения:

$$\Delta\lambda_{\text{эф}} = \Delta\lambda_{\text{м}} + \Delta\lambda_{\text{л}} + \Delta\lambda_{\text{к.к.}} + \lambda_{\text{л.к.к.}} \quad (1)$$

Из этого следует, что дальнейшей задачей настоящей работы должна быть разработка (на основании проведенных исследований) конструкций и технологий, которые исключают образование в изготавливаемых на криососудах пакетах ЭВТИ дефектов. В связи с этим были разработаны новые научные подходы, создано 28 оригинальных методик, изготовлены необходимые установки и использованы в экспериментах около 7000 криососудов. Они позволили впервые исследовать новые особенности двух- и трехмерных процессов теплопереноса в сопряженных многоэлементных конструкциях теплозащиты, а также газообмена в системе свободный объем - адсорбированный слой – газ, растворенный в материалах ЭВТИ при температурах от 4,2 до 390 К и долгосрочных (до 10 лет) процессах.

В результате разработана технология изолирования криососудов пакетами ЭВТИ с использованием малопрочных прокладочных бумаг (типа НТ-10, УНТ-10, АНТ-10 и других) путем использования искусственных зарядов статического электричества величиной $(6...8) \cdot 10^{-7}$ Кл/м². При этом устранялся разрыв полос данного материала в процессе машинного изолирования криососудов. Установлены также значения для комплекса из 11 следующих параметров, положительно влияющих на конструкции и технологии для проектирования и изготовления теплозащиты на криососудах без дефектов с минимальной ($\lambda_{\text{эф.мин}}$) теплопроводностью:

$$\lambda_{\text{эф.мин}} = f(T_0, T_{\text{мин}}, \delta_{\text{ср.и.}}, P_0, W_0, \rho_0, A_0, I_0, Z_y, n_{\text{г.о.}}, M_{\text{и}}) \quad (2)$$

где I_0 – улучшенная конструкция пакета ЭВТИ, исключающая образование слоев криоконденсата; Z_y – заземляющее устройство для снятия зарядов статического электричества, возникающих при изолировании; A_0 - улучшенная конструкция вакуумного адсорбционного насоса; T_0, P_0, W_0, ρ_0 – оптимальные значения температуры, давления газа, газоотделения, плотности слоев ЭВТИ, соответственно; $\delta_{\text{ср.и.}}$ – среднеинтегральная толщина слоев ЭВТИ на криососудах; $T_{\text{мин}}$ – минимальная температура охлаждения слоя адсорбента в адсорбционном вакуумном

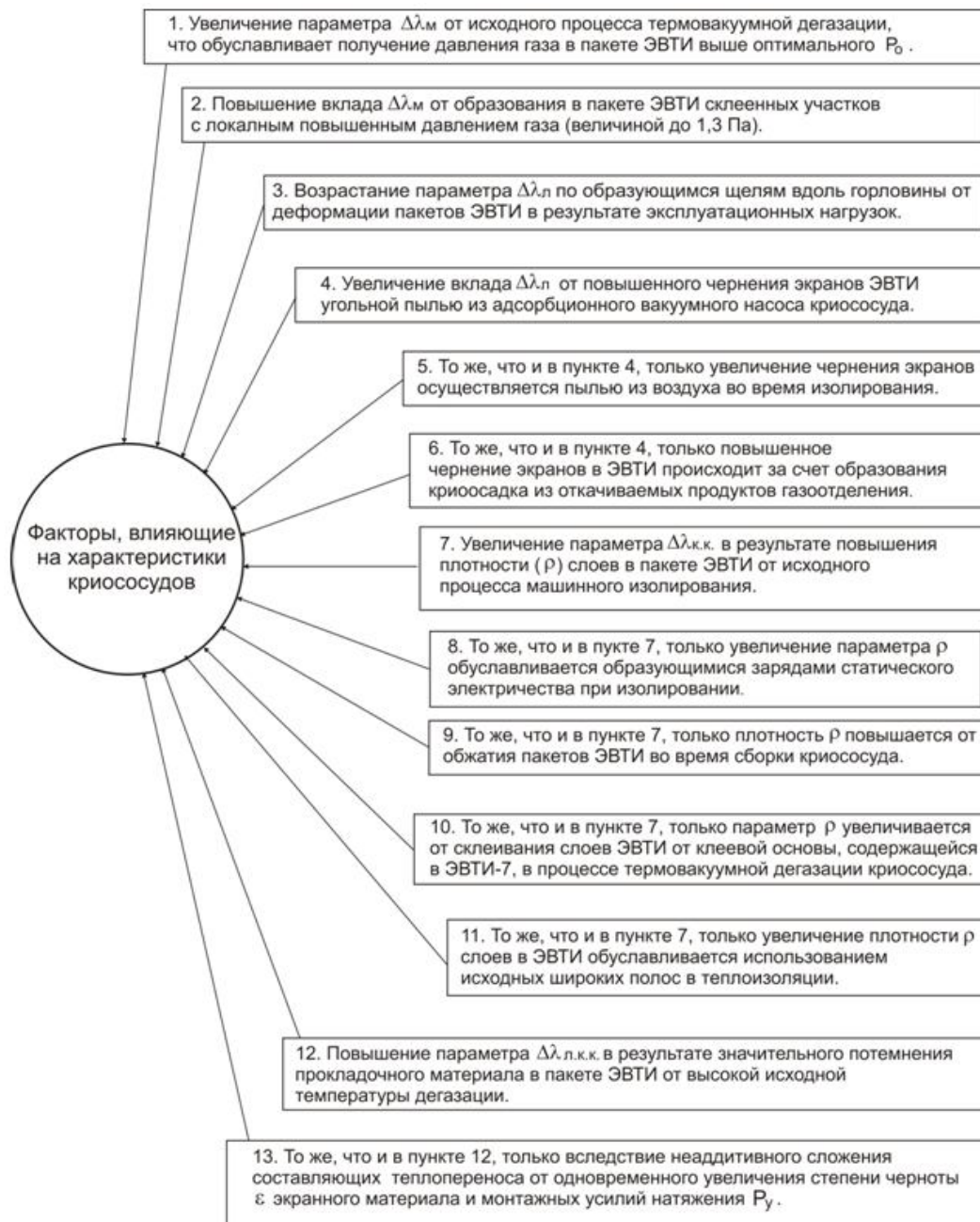


Рис. 2. Факторы, ухудшающие тепловые характеристики первоначально смонтированных пакетов ЭВТИ на криососудах

насосе; M_n – выбранный высокоэффективный современный изоляционный материал для пакетов ЭВТИ.

Полученные таким образом минимальные коэффициенты теплопроводности $\lambda_{эф.мин}$ для новых пакетов ЭВТИ на криососудах представлены в табл. 1. Их анализ показывает, что для теплозащиты с прокладочной стекловалью ЭВТИ-7 коэффициенты теплопроводности уменьшились до значений $(9-14) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) (в $\sim 2,8$ раза). Однако, они являются еще высокими. Поэтому использование в криососудах теплозащитной композиции ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7 является нецелесообразным.

Для улучшенных пакетов ЭВТИ с новыми композиционными прокладочными материалами (СНТ-10, УСНТ-10 и другими, перечисленными в табл. 1) впервые получены коэффициенты теплопроводности на криососудах, равные $(3,6-4,8) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), которые лишь на 24-27 % оказались большими за калориметрические значения. Их использование, например, в криососуде X-34Б (емкостью 35 л) позволило увеличить ресурс работы (при разовом заполнении жидким азотом) со 100-110 суток до 390-400 суток (в $\sim 3,6$ раза). Данная характеристика оказалась в 1,6 раза выше лучшего зарубежного аналога – французского криососуда RSV-35A.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что причиной низкой эффективности серийных криососудов с теплозащитными полосами ЭВТИ, смонтированными машинным орбитальным способом по эмпирическим технологиям, являются 13 дефектов. Они обуславливают склеивание слоев ЭВТИ, увеличение степени черноты экранного материала до 10 раз, давления газа на 2-4 порядка, плотность слоев ЭВТИ в 3...4 раза, а также другие ухудшения. Это обеспечивает увеличение молекулярного, лучистого, контактно-кондуктивного теплопереноса и эффективной теплопроводности в 11-13 раз.

Разработанные новые научные подходы и экспериментальные методики (более 20) позволили исследовать особенности двух- и трехмерных процессов теплопереноса в теплозащите криососуда. Это дало возможность установить значения для из 11 параметров, обуславливающих проектирование и изготовление криососудов с теплозащитными пакетами ЭВТИ, которые лишь на 24-27 % превышают теплопроводность их калориметрических образцов.

Использование усовершенствованных пакетов ЭВТИ с новыми композиционными прокладочными материалами на криососудах позволило получить

для них тепловые характеристики, превышающие лучшие мировые аналоги.

Литература

1. Выбор и реализация путей снижения теплопритоков в криососуде с жидким азотом [Текст] / Р.С. Михальченко, В.Ф. Гетманец, Г.Г. Жунь [и др.] // Инж.-физ. журнал. – 1989. – Т.57, № 1. – С. 95-100.
2. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками [Текст] / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.И. Шалаев [и др.] // Межвузовский сборник научных трудов: Процессы и аппараты криогенной технологии и кондиционирования. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С. 59-64.
3. Жунь, Г.Г. Повышение эффективности промышленных криососудов [Текст] / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. - №28 (95). – С. 30-40.
4. Жунь, Г.Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов [Текст] / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. - №43 (116). – С. 43–51.
5. Мильман, С.Б. Исследование оптических характеристик и лучистого теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах методом ИК-спектроскопии [Текст] / С.Б. Мильман, М.Г. Каганер, Н.Г. Селюков // Журнал прикладной спектроскопии. – 1976. – Т.25, Вып. 2. – С. 277–283.

Поступила в редакцию 23.03.2012

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

ВИЯВЛЕННЯ ТА УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ У КРІОПОСУДАХ

Г.Г. Жунь

В роботі наведені результати дослідження двох – та трьохмірних процесів теплопереносу в теплозахисті кріопосудів із смуг екрано-вакуумної теплоізоляції (ЕВТІ). Встановлено, що причинами збільшення її теплопровідності на кріопосудах в порівнянні з їх калориметричними зразками являється виникнення в них різних дефектів. Визначені значення для встановленого комплексу з 11 параметрів, які поліпшують конструкції і технології для проектування та виготовлення кріопосудів з теплозахистом із пакетів ЕВТІ без дефектів, теплопровідність яких лише на 24-27 % перевищує калориметричні значення. Виготовлені кріопосуди з даним теплозахистом мають ресурс роботи при разовому заповненні, який перевершує кращі закордонні аналоги.

Ключові слова: екрано-вакуумна теплоізоляція (ЕВТІ); кріопосуд; теплопровідність, калориметр; теплоперенос.

REVEALING AND ELIMINATION DEFECTS IN CRYOVESSELS

G.G. Zhun'

The paper reports results of studies of 2D- and 3D-processes of heat and mass transfer in cryovessels heat shielding consisting of bands of thermal superinsulation. It was established that the increase of its thermal conductance in cryovessels compared to their calorimetric samples is caused by various damages. The values for established set of 11 parameters were determined which optimized construction and technology of designing and manufacturing cryovessels with enhanced, damage-free, superinsulation heat shielding whose thermal conductivity was only by 24-27 per cent over the calorimetric values. The cryovessels made using such heat shielding have operation time per one filling with liquid nitrogen that exceeds best worldwide known prototypes.

Key words: thermal superinsulation, cryovessel, heat shielding, heat conductance, calorimeter, heat and mass transfer

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