

УДК 536.21:536.48

Г.Г. ЖУНЬ

*Национальный технический университет "ХПИ", Украина***ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ КРИОСОСУДА**

Предложен способ разработки высокоэффективной теплозащиты с экранно-вакуумной теплозащитой (ЭВТИ) для криоёмкостей, криососудов и криоустройств, широко используемых в ракетно-космической и криогенной технике, криомедицине и животноводстве для хранения и использования в значительных объемах жидких N_2 , H_2 и He .

экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), теплопроводность, тепломассоперенос, криососуд, вакуум, давление, температура, оптимизация

Введение

Ранее выпускаемые в значительных количествах различные криососуды, криоёмкости и криоустройства с машинным ускоренным их изолированием (за 0,5...1 ч) слоями экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) характеризовались в 2...3 раза большими потерями ожиженных газов, чем из космических криостатов, изготавливаемых в единичных экземплярах в криогенных центрах различных стран (в том числе во ФТИНТ НАНУ, Харьков) с ручным очень медленным (в течение нескольких недель) их изолированием пакетами ЭВТИ. Предложен способ разработки высокоэффективной теплозащиты с ЭВТИ для различных криоёмкостей и криососудов (с характеристиками близкими к космическим криостатам), широко используемых в ракетно-космической технике для транспортирования, хранения в значительных объемах жидкого азота и водорода в ракетных системах, а также для создания альтернативных экологически чистых источников энергии для транспортных средств.

1. Анализ состояния проблемы теплозащиты криосистем и обоснование задач исследования

Долгие годы причины расхождения между тепловыми характеристиками космических криостатов

и криососудов не были понятными для специалистов из-за отсутствия достаточно апробированных теоретических соотношений для их исследования и анализа. Не существовали и методики и установки для экспериментального исследования сложных процессов тепломассопереноса в теплозащите с пакетами ЭВТИ на криососудах, теплопритоков отдельно по всем конструктивным элементам, теплопроводности ($\lambda_{эф}$) их пакетов ЭВТИ и многих других параметров. Это не позволяло оценить совершенство используемых в криососудах конструкций и их тепловую эффективность.

Анализ положений незавершенной и неапробированной методики теплового расчета криососудов [1], а также состояния пакетов ЭВТИ в них после их эксплуатации в течение 10 лет и более позволили установить, что их теплопроводность $\lambda_{эф}$ должна определяться (согласно соотношения (1)) многими параметрами:

$$\lambda_{эф} = f(\lambda_{\perp}, \lambda_{\parallel}, P, \Delta T, \delta_{и.ср.}, F_{ср.}, P_y, h, \rho, \Delta\lambda_m, \Delta\lambda_l, \Delta\lambda_{ж.к.}, \Delta\lambda_{л.к.к.}), \quad (1)$$

где $\lambda_{\perp}$, $\lambda_{\parallel}$ – теплопроводность в поперечном и продольном слоях ЭВТИ направлении; P – давление газа в теплоизоляции; ΔT – перепад температуры по толщине пакета ЭВТИ; $\delta_{и.ср.}$ – среднеинтегральная толщина пакета ЭВТИ на криососуде; $F_{ср.}$ – средняя поверхность теплоизоляции в криососуде, P_y – мон-

тажное усилие натяжения; h – ширина раскроя исходного материала ЭВТИ на полосы; ρ – плотность укладки слоев в пакете ЭВТИ, $\Delta\lambda_m, \Delta\lambda_l, \Delta\lambda_{ж.к.}, \Delta\lambda_{л.к.к.}$ – дополнительные молекулярный, лучистый, контактно-кондуктивный и лучисто-контактно-кондуктивный составляющие механизмов теплопереноса через пакет ЭВТИ, образующихся от влияния более 10-ти выявленных ухудшающих факторов.

Теоретических соотношений для расчета такой теплопроводности для пакета ЭВТИ на криососудах, осложняемой значительным числом различных параметров, не существовало.

Значительную информацию об особенностях происходящих процессов тепломассопереноса в теплозащите криососудов возможно получить из анализа измеренных профилей температуры $T(l), T(\delta)$ и давления $P(l), P(\delta)$ в продольном и поперечном слоях ЭВТИ направлении, а также величин газоотделения (W). Методики измерения температуры в таких слоях ЭВТИ не были известными. Не существовали и апробированные миниатюрные датчики давления для измерения данного параметра в такой теплоизоляции в диапазоне от 10^{-4} до 10^1 Па. Из анализа положений незавершенной теории процессов вакуумирования $P(\tau_e)$ и газоотделения $W(\tau_e)$ для материалов теплозащиты [2] установлено, что значения параметров P и W в пакете ЭВТИ обуславливаются многими параметрами, согласно соотношений

$$P = f(W, a, D_{\perp}, D_{\parallel}, \delta_{u.c.p.}, l, S_y, S_o, \tau_a, \tau_{np}, \tau_e, \tau_D, B_i^*) \quad (2)$$

и

$$W = f(T_o, \tau_e, D_T, \tau_D, V_a, E_n, \bar{H}), \quad (3)$$

где a – величина сорбции газов на адсорбенте вакуумного насоса криососуда; $D_{\perp}, D_{\parallel}$ – коэффициенты диффузии в поперечном и продольном слоях ЭВТИ направлении; l – расстояние откачки молекул; S_y, S_o – поверхность вакуумируемого материала и штуцера откачки; $\tau_a, \tau_{np}, \tau_e, \tau_D$ – время жизни молекул в адсорбированном состоянии, пролета между столк-

новениями, процесса вакуумировки и диффузии молекул из материала, соответственно; $B_i^*, \bar{H}$ – безразмерные коэффициенты газообмена в вакуумной системе и через поверхность материала; T_o – оптимальная температура процесса вакуумирования; D_T – коэффициент диффузии молекул из вакуумируемого материала; V_a – тепловая скорость молекул; E_n – энергия преодоления приповерхностного барьера.

Вследствие неизвестности способов определения многих из перечисленных в соотношениях (2) и (3) параметров неапробированными оставались в теории [2] и уравнения для расчета параметров P и W для пакетов ЭВТИ.

Из проведенного анализа сделан вывод о необходимости решения принципиально новых научных задач выявления основных закономерностей и физических параметров для многомерных сопряженных процессов тепломассопереноса в многоэлементных теплоизоляционных конструкциях с пакетами ЭВТИ на промышленных криососудах (осложняемых выявлением значительного количества ухудшающих факторов), путем экспериментально-расчетных исследований по разработанным оригинальным устройствам и методикам на изготовленных установках. На основании полученных результатов следовало разработать комплекс научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий для оптимизации теплозащитной конструкции криососуда.

Вследствие сложности многомерных сопряженных процессов тепломассопереноса в теплозащитной конструкции криососудов было решено комплекс научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий для оптимизации всех характеристик криососуда (K_o) разрабатывать из результатов такой оптимизации для 5-ти его отдельных основных составляющих факторов (устраняющих причины снижения тепловых характеристик криососуда от ухудшающих факторов (K_y); оптимизирующих

все выявленные параметры машинного способа изолирования криососудов полосами ЭВТИ с воспроизводимой минимальной теплопроводностью $\lambda_{эф.min}$ (K_m); способствующих достижению предельной максимальной степени использования холода паров $\mathcal{E}_{х.мах}$ (K_x), обуславливающих конструкцию адсорбционного вакуумного насоса с максимальной защитой его адсорбента от "отравляющего" воздействия высококипящих молекул H_2O , CO_2 и других, содержащихся в откачиваемых продуктах газоотделения из материалов теплозащиты (K_a); ускоряющих процесс термовакuumной дегазации материалов изоляционной полости для достижения оптимального газоотделения W_o и давления P_o за регламентированное время τ_o (K_o). Из этого следует, что комплекс K_o для оптимизации характеристик всего криососуда должен обуславливаться 5-ю его составляющими согласно соотношения

$$K_o = f(K_y, K_m, K_x, K_a, K_o). \quad (4)$$

2. Результаты оптимизации теплозащиты криососуда

В настоящей работе выявление новых основных закономерностей многомерного сопряженного процесса тепломассопереноса в теплозащите криососуда осуществлялось путем экспериментально-расчетных исследований с использованием более 20 разработанных оригинальных устройств и методик на изготовленных установках и с применением более 7000 серийных криососудов. В опытных криососудах варьировались определенные параметры, конструкции и технологии, а также различное (в том числе многолетнее) воздействие на их теплозащиту вакуума, низких температур, динамических эксплуатационных нагрузок и термоциклирования. При этом экспериментально исследовались в них изменения: теплопритоков по отдельным конструктивным элементам, теплопроводность пакета ЭВТИ, степень использования холода паров криоагентов,

изменения профилей температуры $T(l)$, $T(\delta)$ и давления $P(l)$, $P(\delta)$ в пакете ЭВТИ, эффективность теплообмена α_d с парами криоагента на локальных участках по высоте неизотермической горловины, ресурса работы криососуда R при разовом заполнении.

В результате было установлено, что в пакете ЭВТИ с прокладочной стекловалью ЭВТИ-7 (использовавшейся в низкокачественных криососудах) имеются участки с локальным повышенным (на ~ 3 порядка) давлением газа (зависимость $P(x/\delta)$ 1, рис. 1) [3] в сравнении с необходимым оптимальным $P_o \leq 10^{-3}$ Па.

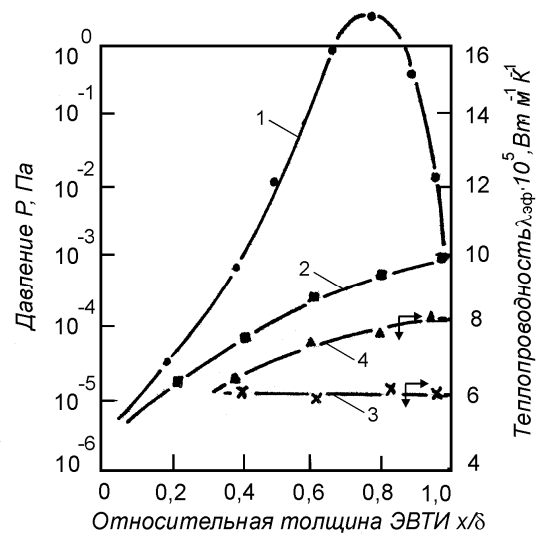


Рис. 1. Изменение давления $P(1,2)$ и теплопроводности $\lambda_{эф}$ (3,4) по относительной толщине (x/δ) слоев в пакете ЭВТИ на криососуде с жидким азотом: 1,4 — теплоизоляция с использованием стекловальи ЭВТИ-7; 2,3 — слои ЭВТИ с бумагой УСНТ-10

Это следует из анализа зависимостей $\lambda_{эф}(P)$ для трех различных пакетов ЭВТИ на криососудах (см. на рис. 2 зависимости 1, 2 и 4) [3]. Локальные участки (рис. 1) образуются в результате слипания слоев ЭВТИ от клеевой основы ПВА, выделяющейся из ЭВТИ-7 при нагревании криососуда в процессе дегазации. В результате слипания теплопроводность пакета ЭВТИ увеличивается на 40 % от увеличения вклада газовой составляющей теплопереноса $\Delta\lambda_g$. Для устранения его в пакете ЭВТИ стали использо-

вать новый (выбранный) прокладочный материал УСНТ-10 (M_u), не содержащий клеевой основы.

Для пакетов ЭВТИ с данной прокладкой зависимость $P(x/\delta)$ 2 (рис. 1) имеет монотонный характер, а полученное давление в ЭВТИ соответствует оптимальному значению P_o .

Для такой теплоизоляции теплопроводность $\lambda_{эф}$ не зависит от ее толщины δ (зависимость $\lambda_{эф}(\delta)$ 3, рис. 1) и увеличивается при наличии клеевой основы (кривая 4, рис. 1).

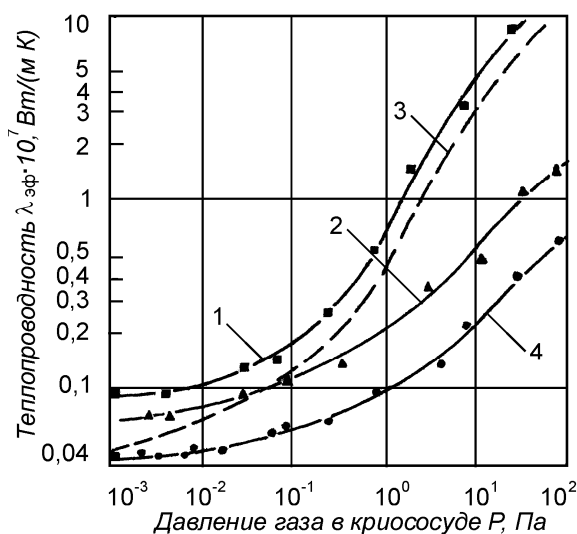


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности ($\lambda_{эф}$) от давления воздуха в криососуде с жидким азотом для следующих изоляционных композиций: 1, 3 – изоляция ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7; 2 – СНТ-10-Д; 4 – ПЭТФ-ДА+УСНТ-10; 3 – калориметрические данные [1]

В пакетах ЭВТИ на низкокачественных криососудах происходит увеличение теплопроводности [4] от повышения: лучистого теплового потока $\Delta\lambda_{л}$ на ~41 % в результате возрастания степени черноты экранов теплоизоляции в 3...8 раз от попадания на них угольной пыли из несовершенной конструкции адсорбционного вакуумного насоса, а также образования слоя криоконденсата из откачиваемых продуктов газоотделения; контактно-кондуктивного теплопереноса $\Delta\lambda_{к.к.}$ на ~6 % от увеличения плотности слоев в пакете ЭВТИ в результате воздействия возникающих при изолировании зарядов статэлек-

тричества величиной $(6...8) \cdot 10^{-7}$ кл/м²; лучисто-контактно-кондуктивного теплового потока $\Delta\lambda_{л.к.к.}$ на ~13 % от одновременного повышения плотности слоев в изоляции и увеличения их степени черноты из различных источников.

Установлено более 10 различных ухудшающих факторов, которые обуславливают увеличение теплопроводности ($\Delta\lambda_y$) пакетов ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+ЭВТИ-7 на низкокачественных криососудах до $(22...28) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), т.е. в 7...9 раз в сравнении с непрогретаемыми образцами данной теплоизоляции на калориметре.

Из этого следует, что ухудшение тепловых характеристик данной теплоизоляции обуславливается увеличением всех составляющих механизмов теплопереноса согласно соотношения

$$\Delta\lambda_y = f(\Delta\lambda_{л}, \Delta\lambda_{к.к.}, \Delta\lambda_{л.к.к.}). \quad (5)$$

На основании полученных результатов исследований разработан комплекс K_y из 9 следующих параметров, конструкций и технологий, с использованием которых устраняется образование в пакетах ЭВТИ ухудшающих факторов: T_o , P_o , W_o , ρ_o – оптимальные значения температуры, давления, газоотделения и плотности укладки слоев в пакете ЭВТИ, соответственно; A_o , Π_o – оптимизированные конструкции адсорбционного вакуумного насоса и пакета ЭВТИ, исключающих образование и попадание угольной пыли в слой теплоизоляции и конденсацию криоосадка, соответственно; $З_y$ – заземляющее устройство для снятия образующихся зарядов статэлектричества в процессе изолирования; $n_{с.о.}$ – оптимальное число подмоточных слоев стекловуали ЭВТИ-7 на горловине для обеспечения склеивания торцов пакета ЭВТИ с ее поверхностью и предотвращения его деформации при эксплуатации.

Таким образом, комплекс K_y обуславливается перечисленными параметрами, конструкциями и характеристиками согласно соотношения:

$$K_y = f(T_o, P_o, W_o, \rho_o, A_o, \Pi_o, З_y, n_{с.о.}, M_u). \quad (6)$$

В результате в таких оптимизированных криососудах теплопроводность, например, для пакета ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 уменьшилась в $\sim 6,7$ раза до значения $(4,1 \dots 4,2) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К).

Для выявления параметров машинного способа изолирования криососудов пакетами ЭВТИ исследовалась зависимость теплопроводности $\lambda_{эф}$ от монтажных усилий натяжения (P_y) для полос теплоизоляции (измеряемых разработанным динамометром), ширины раскроя изолируемого материала на полосы (h) и от диаметра (D) изолируемого внутреннего резервуара криососуда [5].

Результаты некоторых таких экспериментальных исследований, на примере изоляции ПЭТФ-ДА+УСНТ-10, с различной шириной их раскроя на полосы (h) на криососудах диаметром 0,18 и 0,38 м, представлены на рис. 3.

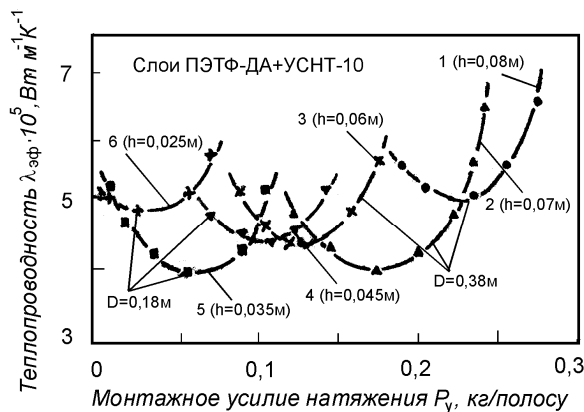


Рис. 3. Зависимость теплопроводности $\lambda_{эф}$ слоев ЭВТИ на криососуде с жидким азотом от монтажных усилий натяжения P_y , ширины их раскроя на полосы h и диаметра изолируемого внутреннего резервуара D

Из них следует, что для криососуда с $D=0,38$ оптимальными являются ширина $h=0,07$ м и усилие натяжения $P_{y.o.}=0,19$ кг/полосу. Для криососуда с $D=0,08$ м – $h_o=0,035$ м, а $P_{y.o.}=0,06$ кг/полосу. В результате оптимизации для двух различных криососудов получены одинаковые воспроизводимые коэффициенты теплопроводности $\lambda_{эф.min}$, близкие к наименьшим их калориметрическим значениям.

Установлено, что к монтажным параметрам относится также количество подмоточных слоев стекловали на поверхности внутренней колбы криососуда $n_{к.о.}$.

Из полученных результатов следует, что комплекс K_m для оптимизации всех выявленных монтажных параметров для изолирования криососудов с воспроизводимой минимальной теплопроводностью $\lambda_{эф.min}$ обуславливается пятью выявленными параметрами согласно соотношения:

$$K_m = f(P_{y.o.}, h_o, n_{к.о.}, n_{к.о.}, D). \quad (7)$$

Установлено, что одной из причин низкой эффективности изготавливавшихся криососудов являлось незначительное использование в них холода паров криоагентов (менее 19 %) для уменьшения суммарных теплопритоков, вследствие несовершенства конструкции их сопряженного узла: торцы ЭВТИ – поверхность горловины. Проведенные исследования позволили установить, что эффективность данного охлаждающего эффекта $\mathcal{E}_x$ в криососудах обусловлена взаимосвязью между сопряженными процессами теплообмена внутри их неизотермической горловины с парами криоагента (α) и теплообменом на ее поверхности с торцами ЭВТИ (K) за счет механизма теплопроводности через стенку горловины. Выявлено 9 параметров, конструкций и технологий, позволивших достигнуть полный теплообмен между торцами ЭВТИ и горловиной (K_{max}) и максимальный коэффициент теплообмена (α_{max}) с парами криоагента внутри горловины, что обеспечило в криососудах с жидкими N_2 , H_2 и He максимального охлаждающего эффекта ($\mathcal{E}_{x.max}$) для них, равного 1,6, 4,8 и 40, соответственно. Это составляет 97, 94 и 89 % от максимальных теоретических значений данных параметров [6].

В результате показано, что в этом случае величина сопряженного продольного теплопереноса Q_{II} по экранному материалу изоляции из пакета ЭВТИ к горловине (с объемом паров криоагента внутри)

превышает поперечный тепловой поток $Q_{\perp}$ через данную теплоизоляцию в криососудах с жидким N_2 , H_2 и He в $\sim 1,6$, ~ 5 и ~ 40 раз, соответственно. Найдено, что комплекс K_x , обеспечивающий достижение в изготавливаемых криососудах максимальное использование холода паров $\mathcal{E}_{x,max}$ обуславливается 9 параметрами и технологиями согласно соотношения:

$$K_x = f(K_{max}, \alpha_{max}, P_{y.o.}, h_o, n_{z.o.}, n_{k.o.}, N_{n.o.}, F_{om\phi}, \mathcal{E}_{Al.o.}). \quad (8)$$

где $N_{n.o.}$ – неравномерное распределение (по установленному закону) торцов пакета ЭВТИ вдоль поверхности горловины; $F_{om\phi}$ – дополнительная поверхность контакта торцов пакета ЭВТИ с горловиной, достигаемая за счет отбортовки торцов ЭВТИ; $\mathcal{E}_{Al.o.}$ – дополнительные экраны из Al-фольги, используемые в пакетах ЭВТИ.

Высокоэффективная работа криососуда (любой криосистемы) во многом определяется совершенством конструкции его вакуумного адсорбционного насоса и сорбционной способностью используемого адсорбента для получения и длительного поддержания в изоляционной полости оптимального вакуума $P_o \leq 10^{-3}$ Па. При этом установлено, что адсорбент для него должен выбираться по величине сорбции к продуктам газоотделения ($a_{n.e.}$) при рабочем давлении ($P_{раб}$) и модификации его поверхности высококипящими молекулами H_2O , CO_2 и другими. Они содержатся в откачиваемых продуктах газоотделения из материалов теплозащиты и оказывают значительное "отравляющее" их сорбционную способность (на ~ 50 %) воздействие [7]. По данной характеристике наиболее эффективным для использования в вакуумном насосе оказался уголь СКТ-4 (M_a) в сравнении с углем БАУ и другими. Выявлено, что комплекс K_a для оптимизации конструкции вакуумного адсорбционного насоса обуславливается 8-ю параметрами, конструкциями и технологиями, согласно соотношения:

$$K_a = f(P_{раб}, T_{min}, W_o, A_o, \mathcal{E}_{z.o.}, V_{n.e.}, a_{n.e.}, M_a), \quad (9)$$

где T_{min} – минимальная температура охлаждения адсорбента в вакуумном насосе; $\mathcal{E}_{z.o.}$ – оптимизированное число защитных тепловых экранов; V_o – суммарный объем продуктов газоотделения из материалов теплозащиты за срок эксплуатации (5, 10, 15 лет). Проведенные исследования показали, что с помощью такой оптимизированной конструкции вакуумного адсорбционного насоса срок поддержания оптимального вакуума в изоляционной полости увеличивается в $\sim 2,5$ раза.

При серийном производстве криососудов большое значение имеет ускорение процесса термовакuumной дегазации изоляционной полости для достижения оптимального газоотделения W_o и давления P_o за регламентированное время (τ_o) при оптимальной температуре T_o и скорости откачки v_o [8]. Экспериментально установлено, что достижение для изоляционной полости газоотделения W_o за время τ_o оказалось возможным лишь после осуществления для адсорбционного и прокладочного изоляционного материала предварительной дегазации в специальной вакуумной камере через штуцер в 3...5 раз большего диаметра (чем в криососуде) при температуре $T_{n.o.} = 390...400$ К в течение $\tau_{n.o.} = 24...28$ ч с откачкой до $P_{n.o.} = 10^{-1}$ Па и последующим насыщением данных материалов сухими N_2 или воздухом (Γ_n) до атмосферного давления. Такая предварительная обработка позволяет дегазировать из данных материалов значительный объем (до 70 %) продуктов газоотделения, состоящих в основном из молекул H_2O . Замена их на молекулы N_2 (или воздуха) ускоряет последующий процесс вакуумирования данных материалов из межстенной полости криососудов в 2,5...3,7 раза, поскольку молекулы N_2 имеют (согласно нашим исследованиям) величину адсорбции $a(P)$ и теплоту этого процесса $Q(a)$, а также время их жизни в адсорбированном состоянии в, соответственно, ~ 2 , $\sim 2,5$ и 4-5 раза меньшие в сравнении с молекулами H_2O . Установлено, что комплекс K_θ для оптимизации процесса дегазации меж-

стенной полости криососудов состоит из 8-ми параметров, конструкций и технологий, согласно соотношения:

$$K_o = f(W_o, T_o, T_{n.o.}, P_{n.o.}, \tau_{n.o.}, \Gamma_n, \tau_z, M_k), \quad (10)$$

где M_k – наиболее эффективный конструктивный материал.

Из полученных результатов исследований теоретических (по развитым нами теориям теплового расчета и вакуумирования), а также экспериментальных новых особенностей многомерных сопряженных процессов в многоэлементной теплозащите криососудов по созданным методикам на изготовленных установках разработан комплекс K_o из 30 научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий, позволивших оптимизировать в криососудах теплопроводность пакетов ЭВТИ до предельной низкой теплопроводности $\lambda_{эф.min}$, близкой к калориметрическим значениям, получать максимальную степень использования холода паров криоагентов $\mathcal{E}_{x.max}$, сравнимую с предельной теоретической, и оптимальный вакуум $P_o \leq 10^{-3}$ Па в изоляционной полости с поддержанием данных параметров в течение 10...15 лет эксплуатации τ_z криососудов (криоустройств) в интервале 4...120 К. В результате в данных оптимизированных криососудах были достигнуты предельные ресурсы работы R_{max} при разовом заполнении их жидким криоагентом на протяжении τ_z . Получение таких характеристик R_{max} для криососудов в течение τ_z определяется использованием комплекса из 30 разработанных научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий (или тремя предельными параметрами $\lambda_{эф.min}$, $\mathcal{E}_{x.max}$ и P_o) для их оптимизации согласно соотношениям:

$$\begin{aligned} R_{max} = f(T_o, P_o, P_{раб}, W_o, T_{min}, T_{n.o.}, P_{n.o.}, \alpha_{max}, \\ K_{max}, \tau_o, \tau_{n.o.}, P_{y.o.}, h_o, n_{z.o.}, n_{k.o.}, \rho_o, a_{n.z.}, \Gamma_n, \\ V_{n.z.}, N_{n.o.}, A_o, I_o, F_{отб}, \mathcal{E}_{Al.o.}, \mathcal{E}_{z.o.}, Z_y, D, \\ M_u, M_a, M_k) \end{aligned} \quad (11)$$

или

$$R_{max} = f(\lambda_{эф.min}, \mathcal{E}_{x.max}, P_o). \quad (12)$$

Разработанный комплекс из 30 научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий и выбранные наиболее эффективные современные изоляционные, адсорбционный и конструктивные материалы внедрен в серийное производство 7-ми типов криобиологических сосудов емкостью от 5 до 35 л на Харьковском заводе транспортного оборудования (ХЗТО), что позволило довести их тепловые, вакуумные и другие характеристики до лучших в мире.

В результате ресурс работы, например, криососуда Х-34Б (35 л) с жидким азотом увеличился со 100-110 до 390...400 суток (в ~3,6 раза). Это в 1,6 раза выше лучшего подобного французского криососуда RVS-35А. От повышения качества выпускаемых криососудов завод ХЗТО получил экономический эффект более 700 тыс. руб. (в ценах 1991 г.).

К настоящему времени уже изготовлено более 160 тыс. таких высокоэффективных криососудов, которые широко используются в ракетно-космическом комплексе, животноводстве, криомедицине и криобиологии на Украине, в странах СНГ, Финляндии, Венгрии, Монголии и других странах.

Следует отметить, что современный и грядущий прогресс в развитии многих отраслей науки, техники, медицины, животноводства, решении проблем жизнеобеспечения, в развитии альтернативных моторных топлив для транспортных средств связывают с использованием явления сверхпроводимости (в том числе высокотемпературной), чистых и сверхчистых газов (получаемых криогенными методами), а также с внедрением жидкого метана, водорода и низкотемпературных процессов в энергетике. Для этого требуется использование значительного количества различных криоустройств, криоемкостей и криососудов с самой эффективной криогенной теплоизоляцией с пакетами ЭВТИ, комплекс научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий для изготовления которых разработан автором и описан в настоящей работе.

Заключение

По полученным результатам экспериментально-расчетных исследований новых особенностей многомерных сопряженных процессов тепломассопереноса в многоэлементной теплозащите с пакетами ЭВТИ на криососудах с использованием разработанных оригинальных устройств и методик на изготовленных установках разработан комплекс из 30-ти научно-обоснованных параметров, конструкций и технологий для проектирования, оптимизации и изготовления различных криососудов и криоемкостей для интервала 4-120 К с предельно низкими потерями жидких криогентов. Разработанный комплекс позволил оптимизировать серийные криобиологические сосуды, выпускаемые на заводе ХЗТО, до тепловых, вакуумных и др. характеристик лучших существующих аналогов.

Литература

1. Гетманец В.Ф., Михальченко Р.С., Вакуленко В.Д. К вопросу неаддитивности тепловых потоков по тепловым мостам и экранно-вакуумной теплоизоляции криогенных устройств // Теплообмен при низких температурах. – К.: Наук. думка, 1979. – С. 120-130.
2. Гетманец В.Ф. Адсорбционно-диффузионная модель газоотделения вакуумных систем // Расчет и исследование криогенных систем. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 22-32.
3. Жунь Г.Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов // Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування. – 1998. – № 43 (110). – С. 43-51.
4. Жунь Г.Г., Гетманец В.Ф., Михальченко Р.С. и др. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т. 56, № 2. – С. 271-276.
5. Жунь Г.Г. Оптимизация технологии монтажа теплозащитных слоев ЭВТИ криососудов // Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування. – 1998. – № 28 (95). – С. 24-30.
6. Эффективность "безэкранного" метода использования холода паров в криососудах с широкой горловиной / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко, П.Н. Юрченко и др. // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т. 54, № 4. – С. 600-607.
7. Жунь Г.Г. Разработка и исследование энергосберегающих адсорбционных насосов для криососудов // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2000. – № 4. – С. 17-25.
8. Жунь Г.Г. Оптимизация процесса термовакuumной дегазации теплозащиты криососудов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аерокосмічний університет "ХАІ", 2001. – Вип. 21. – С. 104-107.

Поступила в редакцию 21.08.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.И. Прохвятилов, Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков.