

УДК 536.21: 536.48

Г. Г. ЖУНЬ, д-р техн. наук

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА КРИОСОСУДАХ

В работе описана новая разработанная комбинированная теплозащитная конструкция из полос ЭВТИ для криососудов, в которой устраняется "отравляющее" воздействие образующихся из продуктов газоотделения слоев криоконденсата. При этом достигается снижение коэффициента теплопроводности на 14-15 % и увеличение ресурса работы криососудов на 18-20 суток.

В роботі описана нова розроблена комбінована теплозахисна конструкція із смуг ЕВТІ для криопосудів, в якій усувається "отрууюча" дія утворених з продуктів газовідділення шарів криоконденсату. При цьому досягається зниження коефіцієнту теплопровідності на 14-15 % і збільшення ресурсу роботи криопосудів на 18-20 діб.

Введение

В последние годы наблюдается расширение использований и разработок в различных областях науки и техники с применением криогенных температур и сжиженных газов. Используемые при этом криоустройства и криостаты должны иметь высокоэффективную теплозащиту. В настоящее время такой криогенной теплозащитой считается экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), образцы которой на калориметре имеют наименьший коэффициент теплопроводности ($\lambda_{\text{эф}}$). Однако использование пакетов ЭВТИ на различных криоустройствах с машинным методом изолирования оказалось неудачным (как в нашей стране, так и за рубежом), вследствие достигаемой для них более высокой в 11–13 раз теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ в сравнении с калориметрическими образцами.

Проведенные исследования позволили установить 13 факторов, обуславливающих ухудшение тепловых характеристик пакетов ЭВТИ на криоустройствах [1]. Один из таких факторов, например, обуславливается образованием слоев криоконденсата в полосах пакета ЭВТИ с температурой ниже 200 К из откачиваемых через них продуктов газоотделения. В результате происходит увеличение степени черноты слоев теплозащиты в 2–3 раза и, как следствие, лучистой составляющей суммарной проводимости. Это является причиной снижения в течение года ресурса работы криососуда Х-34Б (емкостью 35 л) при разовом заполнении жидким азотом на 30-40 % при использовании в теплозащите стекловуали ЭВТИ-7 с клеевой основой и на 5–7 % с новыми прокладочными бумагами [4].

Для предотвращения образования данного ухудшающего фактора в криососудах было предложено в слоях ЭВТИ с температурой выше 250 К (составляющих 30–35 % от общего количества) использовать экранную металлизированную пленку ПЭТФ-ДА с перфорированными отверстиями диаметром 2·10⁻³ м со степенью перфорации 3,14 % [2]. В результате этого увеличилась газопроницаемость теплых слоев ЭВТИ и продукты газоотделения начали откачиваться не в сторону холодной их части, а по направлению к наружной теплой стенке криососуда. Далее данные газы вдоль стенки откачиваются к горловине, которая со смонтированными вдоль ее поверхности торцами полос ЭВТИ представляет в криососуде пористый канал высокой газопроницаемости (по сути вакуумопровод) [3]. Далее продукты газоотделения через пористый канал откачиваются адсорбционным вакуумным насосом криососуда, смонтированным на холодной стенке его внутреннего резервуара.

Технология машинного изолирования криососудов с перфорированными слоями в теплой зоне оказалась трудоемкой операцией. Поэтому представило интерес разработать

новый метод изготовления теплозащитных полос ЭВТИ на криососудах с повышенной газопроницаемостью на $\sim 1/3$ части возле наружной стенки, например, путем уменьшения плотности их слоев.

Целью работы является разработка нового метода изготовления композиционных пакетов ЭВТИ на криососудах с повышенной газопроницаемостью полос данной теплоизоляции на участке с температурой выше 250 К, которую необходимо обеспечить уменьшением их плотности (ρ) монтажными усилиями натяжения P_y [4]. Это должно обеспечить откачку продуктов газоотделения из пакетов ЭВТИ в сторону теплой стенки криососудов, а также предотвратить образование в холодной части пакетов ЭВТИ слоев криоконденсата и ухудшение тепловых характеристик.

Основные результаты

В настоящей работе новая методика изготовления комбинированной теплозащитной конструкции из пакетов ЭВТИ с повышенной газопроницаемостью в теплой их зоне исследовалась на криососудах со слоями ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 и ПЭТФ-ДА+СНТ-10.

Ранее [4] было установлено, что эффективность смонтированных машинным способом на криососудах слоев ЭВТИ определяется монтажными параметрами: усилия натяжения P_y и шириной раскроя исходного изоляционного материала на полосы (h). При этом значения данных монтажных параметров обуславливаются составом изоляционной композиции и величиной диаметра (D) изолируемого резервуара криососуда (см. в табл. 1 и 2 криососуды № 1).

Таблица 1

Изменение ресурса работы (R) криососудов и коэффициентов теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для их теплозащитных слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10, смонтированных на резервуарах с $D = 0,38$ м и оптимальными монтажными параметрами ($P_{y.o.}$, ρ_o , h_o) (криососуд № 1) и комбинированным способом (криососуды № 2–4), после хранения в них жидкого азота в течение (τ) 10 суток (1), 0.5 года (2) и 1 года (3)

№№ криососудов	Монтажные параметры пакетов ЭВТИ	1 ($\tau = 10$ суток)		2 ($\tau = 0.5$ года)		3 ($\tau = 1$ год)	
		$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки	$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки	$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки
1	$P_{y.o.}=0,19$ кг/полосу, $\rho_o=16$ экp/см, $h_o=0,07$ м	4,0	372	4,3	368	4,7	354
2	$P_{y.o.}=0,17$ кг/полосу, $\rho_o=14$ экp/см, $h_o=0,07$ м	3,8	383	3,9	375	4,1	370
3	$P_{y.o.}=0,14$ кг/полосу, $\rho_o=12$ экp/см, $h_o=0,07$ м	3,5	392	3,6	390	3,6	391
4	$P_{y.o.}=0,11$ кг/полосу, $\rho_o=9$ экp/см, $h_o=0,07$ м	3,7	386	3,7	385	3,7	385

При проведении настоящих исследований в пакетах ЭВТИ на криососудах поддерживалось оптимальное давление ($P_o \leq 10^{-3}$ Па), что обуславливало в них теплоперенос только за счет лучистой и контактно-кондуктивной составляющих. Тепловые характеристики опытных криососудов определялись по методике и на установках, описанных в работах [5, 6].

Установленные для исследуемых в настоящей работе пакетов ЭВТИ оптимальные значения монтажных параметров ρ_o , $P_{y.o.}$ и h_o и достигаемые, в результате, для них минимальные коэффициенты теплопроводности ($\lambda_{эф.min}$) на криососудах Х-34Б с жидким азотом, приведены в табл. 1 и 2 (криососуды № 1). При хранении в данных криососудах жидкого азота в течение одного года, в результате постепенного увеличения слоя образующегося криоосадка из откачиваемых через холодные полосы ЭВТИ продуктов газоотделения, происходит увеличение их степени черноты и, как следствие, повышение лучистого теплопереноса.

В результате происходит увеличение коэффициентов теплопроводности для теплоизоляции ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 с $4 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ до $4,2 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на 5 %), а для слоев ЭВТИ из ПЭТФ-ДА+СНТ-10 – с $4,5 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ до $4,8 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на ~7 %). Вследствие этого в данных криососудах происходит понижение ресурса работы на 5–7 %.

Далее для двух опытных пакетов ЭВТИ были изготовлены на криососудах комбинированные теплозащитные конструкции с повышенной газопроницаемостью на участках с температурой выше 250 К. Результаты исследования данных конструкций представлены в табл. 1 и 2 (криососуды №2-4), а также на рис. 1.

Таблица 2

Изменение ресурса работы (R) криососудов и коэффициентов теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для их теплозащиты из слоев ПЭТФ-ДА+СНТ-10, смонтированных на резервуарах с $D = 0.38$ м и оптимальными монтажными параметрами ($P_{y.o.}$, ρ_o , h_o) (криососуд № 1) и комбинированным способом (криососуды № 2–4), после хранения в них жидкого азота в течение (τ) 10 суток (1), 0.5 года (2) и 1 года (3)

№№ криососудов	Монтажные параметры пакетов ЭВТИ	1 ($\tau = 10$ суток)		2 ($\tau = 0.5$ года)		3 ($\tau = 1$ год)	
		$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки	$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки	$\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс R , сутки
1	$P_{y.o.}=0,23$ кг/полосу, $\rho_o=20$ экр/см, $h_o=0,075$ м	4,5	358	4,7	354	4,8	335
2	$P_{y.o.}=0,20$ кг/полосу, $\rho_o=16$ экр/см, $h_o=0,075$ м	4,2	368	4,4	360	4,6	356
3	$P_{y.o.}=0,16$ кг/полосу, $\rho_o=13$ экр/см, $h_o=0,07$ м	3,9	375	3,9	376	3,9	375
4	$P_{y.o.}=0,13$ кг/полосу, $\rho_o=10$ экр/см, $h_o=0,075$ м	4,0	371	4,0	372	4,0	371

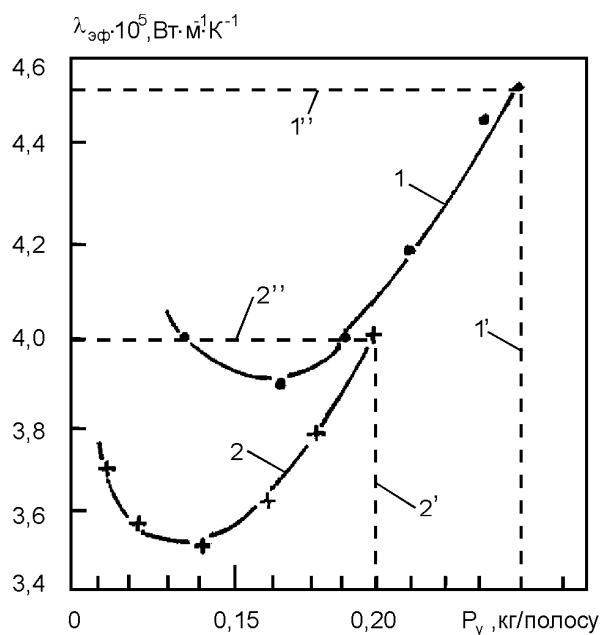


Рис. 1. Изменение коэффициентов теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для комбинированной конструкции из полос ЭВТИ на криососудах с жидким азотом при варьировании величины их монтажных усилий натяжения (P_y) (плотности слоев (ρ) в процессе изолирования на участках с температурой выше 250 К: 1, 2 – пакеты ПЭТФ-ДА+СНТ-10 и ПЭТФ-ДА+УСНТ-10, соответственно; 1', 2' – оптимальные значения монтажных усилий натяжения $P_{y.o.}$ для слоев изоляции; 1'', 2'' – минимальные значения коэффициентов теплопроводности для слоев ЭВТИ ($\lambda_{эф.min}$), достигаемые при их изолировании с оптимальными монтажными параметрами.

Из полученных результатов следует, что по мере понижения плотности ρ для смонтированных полос ЭВТИ на теплом участке (путем уменьшения монтажных усилий натяжения P_y) происходит увеличение их газопроницаемости, что способствует снижению "отравляющего" воздействия криоосадков на тепловые характеристики криососудов. При уменьшении, например, плотности для слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 с 16 экр/см до 14 экр/см через год хранения в криососуде с данной теплоизоляцией жидкого азота его ресурс R уменьшается уже только на 3,5 % (криососуд № 2, табл. 1). Это меньше в сравнении с криососудом № 1, смонтированным с оптимальными монтажными параметрами. В результате снижения плотности полос ЭВТИ уменьшается контактно-кондуктивная составляющая теплопереноса, что обуславливает понижение их теплопроводности с $4 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ до $3,8 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на ~5 %), а также ресурса работы криососуда R с 372 суток до 383 суток. Близкие результаты получены и для криососудов с полосами ПЭТФ-ДА+СНТ-10, что следует из сравнительного анализа результатов для криососудов № 2 и № 1 в табл. 2.

Дальнейшее снижение плотности ρ для полос ЭВТИ с монтажными усилиями натяжения P_y на теплых участках комбинированной теплозащитной конструкции криососудов позволило определить рациональную их плотность (ρ_p), которая для полос из ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 составляет 12 экр/см (при монтажных усилиях натяжения $P_y = 0,14$ кг/полосу), а для теплоизоляции из ПЭТФ-ДА+СНТ-10 – $\rho_p = 13$ экр/см при $P_y = 0,16$ кг/полосу, что следует из анализа результатов для криососудов № 3 в табл. 1 и 2, а также из рис. 1. Установлено, что при достижении данной плотности ρ_p для полос ЭВТИ на теплом участке откачка продуктов газоотделения из них уже осуществляется только в сторону теплой стенки криососуда, что исключает образование слоев криоконденсата и ухудшение их тепловых характеристик. При этом, от уменьшения контактно-кондуктивной составляющей теплопереноса теплопроводность комбинированной теплозащитной конструкции со слоями из ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 понижается с $4 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ до $3,5 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на 14 %), а для ПЭТФ-ДА+СНТ-10 – с $4,5 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ до $3,9 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на ~15 %). В результате ресурс работы R криососудов с данной комбинированной теплозащитой увеличился на 18–20 суток, что следует из анализа результатов для криососудов № 1 и № 3 в табл. 1 и 2.

При дальнейшем уменьшении плотности ρ для монтируемых слоев ЭВТИ на теплых участках ниже установленного для них рационального значения ρ_p (снижением монтажных усилий натяжения P_y) начинается повышение коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$ для комбинированной теплозащитной конструкции на криососудах, что следует из анализа результатов для криососудов № 4 в табл. 1 и 2, а также на рис. 1. Это связано с увеличением в

теплоизоляции лучистой составляющей теплопереноса в большей степени (с уменьшением плотности), чем одновременное снижение в ней контактно-кондуктивной проводимости. В данной теплоизоляции с повышенной газопроницаемостью слоев ЭВТИ на теплых участках не образуются слои криоконденсата, поэтому при длительном хранении в криососудах с ней жидкого азота не происходит ухудшение их тепловых характеристик (криососуды № 4, табл. 1 и 2).

Далее представило интерес исследовать особенности для полученных профилей температурной зависимости коэффициентов теплопроводности пакетов ЭВТИ $\lambda_{эф}(T)$, смонтированных на криососудах с оптимальными монтажными параметрами, а также при изготовлении из них комбинированной теплозащитной конструкции с рациональной плотностью ρ_p их слоев на теплом участке возле наружной стенки. Полученные результаты представлены на рис. 2.

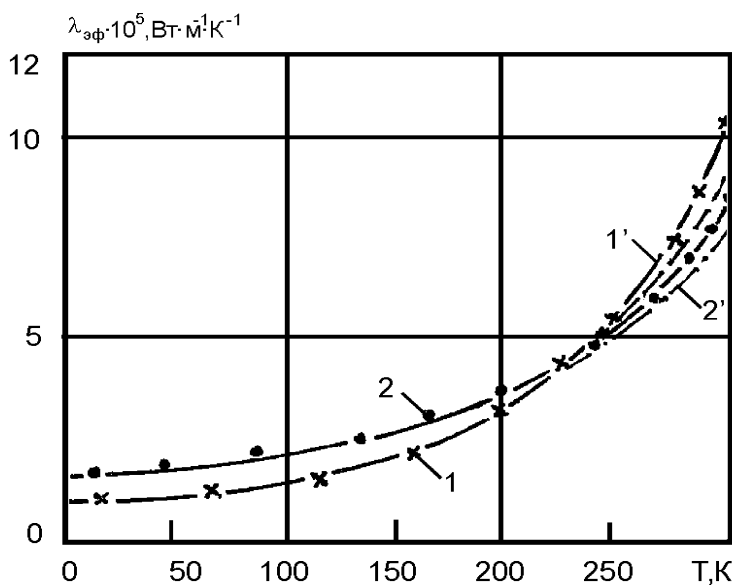


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов теплопроводности для пакетов ЭВТИ на криососудах с жидким азотом: 1, 1' и 2, 2' — пакеты ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 и ПЭТФ-ДА+СНТ-10, соответственно; 1, 2 — пакеты ЭВТИ смонтированы с оптимальными монтажными параметрами; 1', 2' — комбинированная теплозащитная конструкция из пакетов ЭВТИ.

Их анализ показывает, что для пакетов ЭВТИ, смонтированных с оптимальными монтажными параметрами на участках с температурой выше 210–230 К, их теплопроводности (кривые $\lambda_{эф}(T)$ 1 и 2) имеют большие значения в сравнении с теплопроводностью теплоизоляций, смонтированных комбинированным способом (зависимости $\lambda_{эф}(T)$ 1' и 2'. В результате суммарные коэффициенты теплопроводности $\lambda_{эф}$ для комбинированных теплозащитных конструкций из пакетов ЭВТИ на криососудах с жидким азотом уменьшаются на 14–15 %. При этом ресурс работы таких криососудов с комбинированной теплозащитой из пакетов ЭВТИ увеличивается на 18–20 суток

Выводы

В работе показано, что теплозащитные конструкции из пакета ЭВТИ, смонтированные на криососудах с оптимальными монтажными параметрами, значительно ухудшают свои характеристики при длительном хранении в них жидкого азота. Установлено, что причиной этого является увеличение в них лучистого теплопереноса, вследствие повышения степени черноты полос теплоизоляции с температурой ниже 200 К от образующихся слоев криоконденсата из откачиваемых продуктов газоотделения. Для предотвращения этого предложена новая конструкция для теплозащитных пакетов ЭВТИ, в которой на 1/3 части с температурой выше 250 К (возле наружной стенки криососуда) их полосы монтируются с пониженной плотностью ρ (путем снижения монтажных усилий натяжения P_y). Это позволяет увеличить их газопроницаемость и изменить направление откачки продуктов газоотделения, а также предотвратить образование из них на холодных участках ЭВТИ слоев криоконденсата. Экспериментально установлено, что рациональная плотность ρ_p для полос пакетов ЭВТИ на теплом участке должна составлять (13–14) экр/см, достигаемая при монтажных усилиях натяжения $P_y = 0,14-0,6$ кг/полосу. При этом, в результате снижения плотности слоев ЭВТИ и понижения контактно-кондуктивной составляющей теплопереноса

суммарный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ для данной комбинированной теплозащитной конструкции криососудов уменьшается на (14–15) %, а его ресурс работы R с жидким азотом увеличивается на 18–20 суток.

Список литературы

1. Жунь Г. Г. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов / Г. Г. Жунь, В. Ф. Гетманец, В. А. Мирошниченко // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т. 56, № 2. – С. 271–276.
2. Жунь Г. Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов / Г. Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – № 43 (110). – С. 43–51.
3. Жунь Г. Г. Исследование пропускной способности экранно-вакуумной изоляции // Г. Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – № 54 (121). – С. 20–28.
4. Жунь Г. Г. Оптимизация технологии монтажа теплоизоляционных слоев ЭВТИ криососудов / Г. Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – № 28 (95). – С. 24–30.
5. Жунь Г. Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов "Харьков-34Б" / Г. Г. Жунь, А. Г. Подольский, В. И. Шалаев // Криогенные системы: разработки и исследования. – К.: Наук. думка. – 1984. – С. 35–42.
6. Жунь Г. Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками / Г. Г. Жунь, А. Г. Подольский, В. И. Шалаев // Межвузовский сборник научн. трудов.: Процессы и аппараты криогенной технологии и кондиционирования. Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – 1985. – С. 59–64.

ENHANCEMENT OF CHARACTERISTICS OF THERMAL SUPERINSULATION IN CRYOVESSELS

G.G. Zhun', Dr. Sci. Tech.

The paper describes a newly developed combined thermal shielding construction composed of thermal superinsulation packets for cryovessels which eliminates "poisoning" action of cryocondensate deposited from the layers gassing products. As a result, the thermal conductivity coefficient is reduced by 14-15% and the vessel operation time is prolonged by 18-20 days.

Поступила в редакцию 19.06 2012 г.



Уважаемые читатели!

**Приглашаем Вас стать подписчиками журнала
«Энергосбережение•Энергетика•
Энергоаудит» на II полугодие 2012 год!**

**На страницах журнала публикуются
статьи об актуальных проблемах
электроэнергетики, энергорынка,
теплоэнергетики, газоснабжения,
водоснабжения, водоотведения и экономики.**

Подписка с любого месяца!

Справки по телефону +38(057) 7-149-451

**На сайте eee-journal.com.ua размещена
информация об условиях подписки на журнал**