

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 криососудів, в якій усувається "отрууюча" дія утворених з продуктів газотділення шарів криоконденсату. При цьому досягається зниження коефіцієнту теплопровідності на 14-15 % і збільшення ресурсу роботи криососудів на 18-20 діб.

Введение

В последние годы наблюдается расширение использования 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 ($\lambda_{эф}$). 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 $\lambda_{эф}$ 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, $\rho_o=16$ экр/см, $h_o=0,07$ м	4,0	372	4,3	368	4,7	354
2	$P_{y.o.}=0,17$ кг/полосу, $\rho_o=14$ экр/см, $h_o=0,07$ м	3,8	383	3,9	375	4,1	370
3	$P_{y.o.}=0,14$ кг/полосу, $\rho_o=12$ экр/см, $h_o=0,07$ м	3,5	392	3,6	390	3,6	391
4	$P_{y.o.}=0,11$ кг/полосу, $\rho_o=9$ экр/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

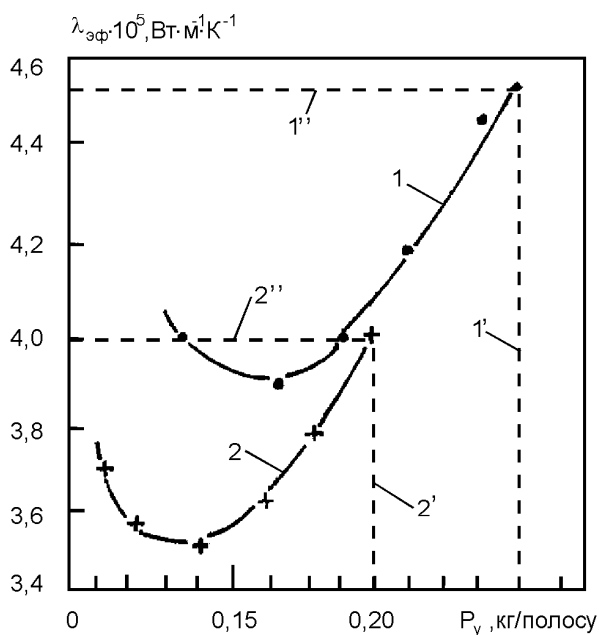


Рис. 1. Изменение коэффициентов теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для комбинированной конструкции из полос ЭВТИ на криососудах с жидким азотом при варьировании величины их монтажных усилий натяжения (P_y) (плотности слоев (ρ) в процессе изолирования на участках с температурой выше 250 К: 1, 2 – пакеты 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.

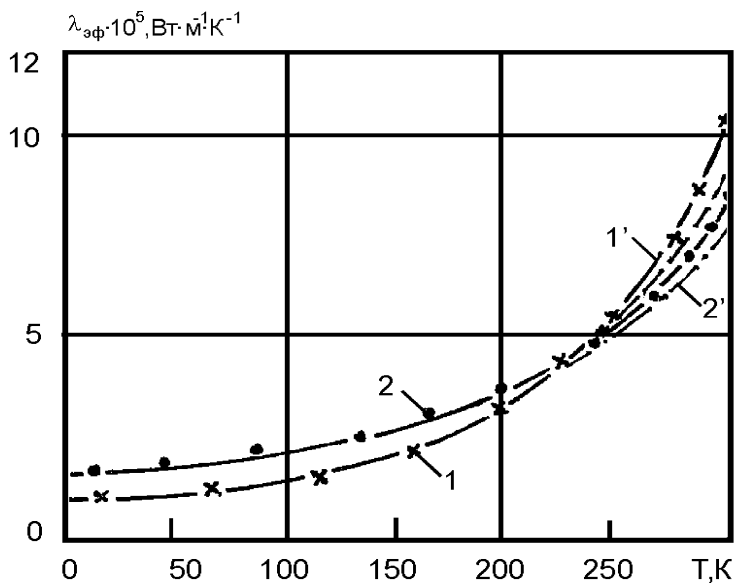


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов теплопроводности для пакетов ЭВТИ на криососудах с жидким азотом: 1, 1' и 2, 2' – пакеты ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 и ПЭТФ-ДА+СНТ-10, соответственно; 1, 2 – пакеты ЭВТИ смонтированы с оптимальными монтажными параметрами; 1', 2' – комбинированная теплозащитная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