

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 газовідділення 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 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 ( $\lambda_{эф}$ ). 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<sup>-3</sup> 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 ( $\rho$ ) 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 ( $P_{y.o.}$ ,  $\rho_o$ ,  $h_o$ ) (криососуд № 1) и комбинированным способом (криососуды № 2–4), после хранения в них жидкого азота в течение ( $\tau$ ) 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)  |                       |
|----------------|---|--|-----------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|
|                |   | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ , сутки | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ , сутки | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ , сутки |
| 1              | $P_{y.o.}=0,19$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=16$<br>экр/см,<br>$h_o=0,07$ м | 4,0  | 372                   | 4,3  | 368                   | 4,7  | 354                   |
| 2              | $P_{y.o.}=0,17$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=14$<br>экр/см,<br>$h_o=0,07$ м | 3,8  | 383                   | 3,9  | 375                   | 4,1  | 370                   |
| 3              | $P_{y.o.}=0,14$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=12$<br>экр/см,<br>$h_o=0,07$ м | 3,5  | 392                   | 3,6  | 390                   | 3,6  | 391                   |
| 4              | $P_{y.o.}=0,11$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=9$ экр/см,<br>$h_o=0,07$ 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  $\rho_o$ ,  $P_{y.o.}$  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<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> до  $4,2 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (на 5 %), а для слоев ЭВТИ из ПЭТФ-ДА+СНТ-10 – с  $4,5 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> до  $4,8 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (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 ( $P_{y.o.}$ ,  $\rho_o$ ,  $h_o$ ) (криососуд № 1) и комбинированным способом (криососуды № 2–4), после хранения в них жидкого азота в течение ( $\tau$ ) 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)  |                          |
|----------------|---|--|-----------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
|                |   | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ , сутки | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ ,<br>сутки | $\lambda_{эф} \cdot 10^5$ ,<br>Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> | Ресурс<br>$R$ ,<br>сутки |
| 1              | $P_{y.o.}=0,23$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=20$ экр/см,<br>$h_o=0,075$ м | 4,5  | 358                   | 4,7  | 354                      | 4,8  | 335                      |
| 2              | $P_{y.o.}=0,20$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=16$ экр/см,<br>$h_o=0,075$ м | 4,2  | 368                   | 4,4  | 360                      | 4,6  | 356                      |
| 3              | $P_{y.o.}=0,16$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=13$ экр/см,<br>$h_o=0,07$ м  | 3,9  | 375                   | 3,9  | 376                      | 3,9  | 375                      |
| 4              | $P_{y.o.}=0,13$<br>кг/полосу,<br>$\rho_o=10$ экр/см,<br>$h_o=0,075$ м | 4,0  | 371                   | 4,0  | 372                      | 4,0  | 371                      |

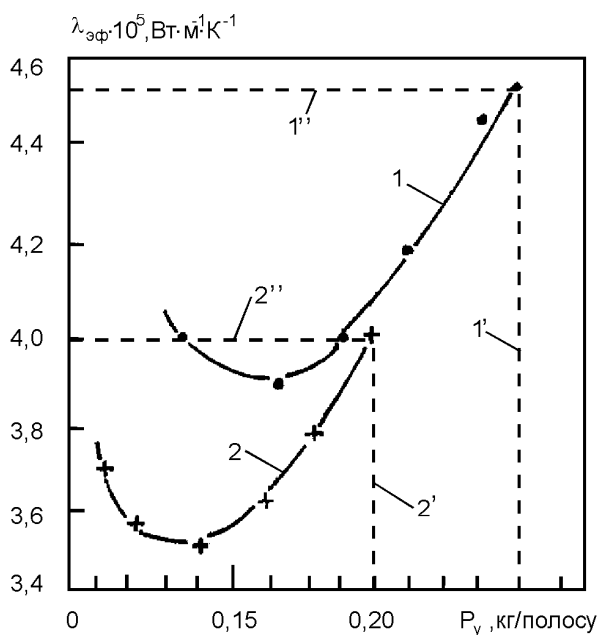


Рис. 1. Изменение коэффициентов теплопроводности ( $\lambda_{эф}$ ) для комбинированной конструкции из полос ЭВТИ на криососудах с жидким азотом при варьировании величины их монтажных усилий натяжения ( $P_y$ ) (плотности слоев ( $\rho$ ) в процессе изолирования на участках с температурой выше 250 К: 1, 2 – пакеты ПЭТФ-ДА+СНТ-10 и ПЭТФ-ДА+СНТ-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  $\rho$  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+СНТ-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<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> до  $3,8 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (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  $\rho$  для полос ЭВТИ с монтажными усилиями натяжения  $P_y$  на теплых участках комбинированной теплозащитной конструкции криососудов позволило определить рациональную их плотность ( $\rho_p$ ), которая для полос из ПЭТФ-ДА+СНТ-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  $\rho_p$  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+СНТ-10 понижается с  $4 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> до  $3,5 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (на 14 %), а для ПЭТФ-ДА+СНТ-10 – с  $4,5 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> до  $3,9 \cdot 10^{-5}$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (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  $\rho$  для монтируемых слоев ЭВТИ на теплых участках ниже установленного для них рационального значения  $\rho_p$  (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  $\rho_p$  их слоев на теплом участке возле наружной стенки. Полученные результаты представлены на рис. 2.

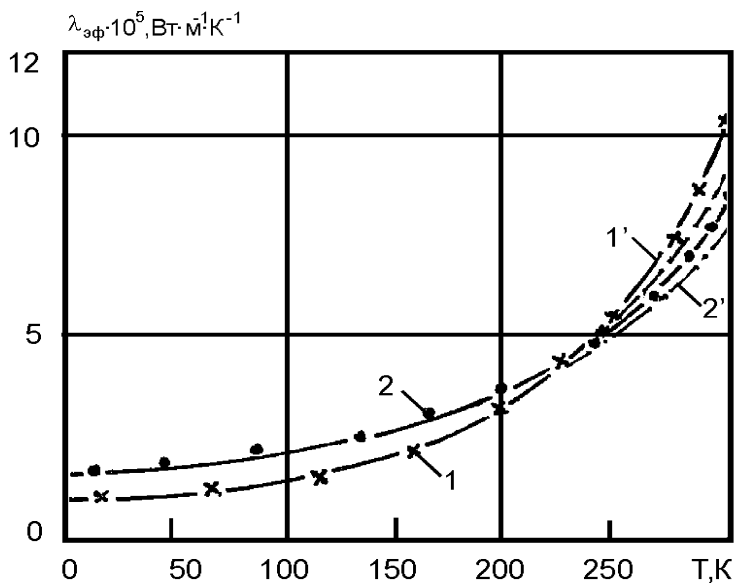


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов теплопроводности для пакетов ЭВТИ на криососудах с жидким азотом: 1, 1' и 2, 2' – пакеты ЭВТИ из слоев ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 и ПЭТФ-ДА+СНТ-10, соответственно; 1, 2 – пакеты ЭВТИ смонтированы с оптимальными монтажными параметрами; 1', 2' – комбинированная теплозащитная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