

УДК 536.21: 536.48

Г. Г. ЖУНЬ, д-р техн. наук, доцент

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КРИОСОСУДАХ

Работа посвящена исследованию взаимосвязи между процессами теплообмена на поверхности горловины криососуда с торцами полос смонтированной теплоизоляции и внутри горловины с парами криоагента, которые обуславливают эффективность всей его конструкции.

Ключевые слова: криососуд, теплообмен, теплозащита, криоагент, горловина.

Робота присвячена дослідженню взаємозв'язку між процесами теплозахисту на поверхні горловины криососуду з торцями смуг змонтованої теплоізоляції та всередині горловины з парами криоагенту, які обумовлюють ефективність всієї його конструкції.

Ключові слова: криососуд, теплопереніс, теплозахист, криоагент, горловина.

Введение

Широкое использование криогенных температур и сжиженных гелия, водорода и азота в различных отраслях науки и техники потребовали разработки различных криососудов, криоёмкостей и криостатов для их транспортирования, хранения и использования с минимальными потерями. Для этого в их теплозащите стали использовать слои экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которая на калориметрах характеризуется самой низкой теплопроводностью ($\lambda_{эф}$). Однако криоустройства с данной теплоизоляцией, смонтированной узкими полосам машинным орбитальным способом по эмпирическим (неоптимизированным) технологиям, оказались низкокачественными. Предполагается, что причиной этого является неэффективное использование холода паров криоагентов для уменьшения суммарных теплопритоков в криососудах, а также получение для их теплозащитных ЭВТИ высокой теплопроводности $\lambda_{эф}$ из-за изолирования полосами с неоптимизированными монтажными параметрами.

Целью работы является исследование взаимосвязи (сопряженности) между значениями монтажных параметров для изолируемых полос ЭВТИ на криососудах и достигаемой в результате теплопроводности $\lambda_{эф}$ для них, эффективностью теплообмена торцов полос теплоизоляции с поверхностью горловины, а через ее стенку (по механизму теплопроводности) с холодными парами криоагента внутри. Это должно обуславливать степень использования холода паров в криососуде и эффективность всей его конструкции.

Основное содержание

В настоящей работе приведены результаты перечисленных выше исследований на примере криососудов с различным диаметром (D) изолируемого внутреннего резервуара. В качестве теплоизоляции использовались пакеты ЭВТИ из полос экранной пленки ПЭТФ-ДА толщиной (δ) 5 мкм и прокладочной бумаги СНТ-10 (с $\delta = 40$ мкм), которые монтировались полосами различной ширины (h) и при различных монтажных усилиях натяжения (P_y).

Экспериментальные исследования проводились на разборном криососуде с жидким азотом по методике и на установке, описанных в работе [1].

На рис. 1 представлена последовательность проведенных исследований с целью определения величин оптимальных монтажных параметров для изолирования внутренних резервуаров криососудов диаметром 0,75 м и 0,38 м пакетами ЭВТИ с самой низкой теплопроводностью. Отметим, что все результаты получены в настоящей работе для пакетов ЭВТИ с оптимальным давлением ($P_o \leq 10^{-3}$ Па), что исключало в них молекулярную составляющую теплопереноса.

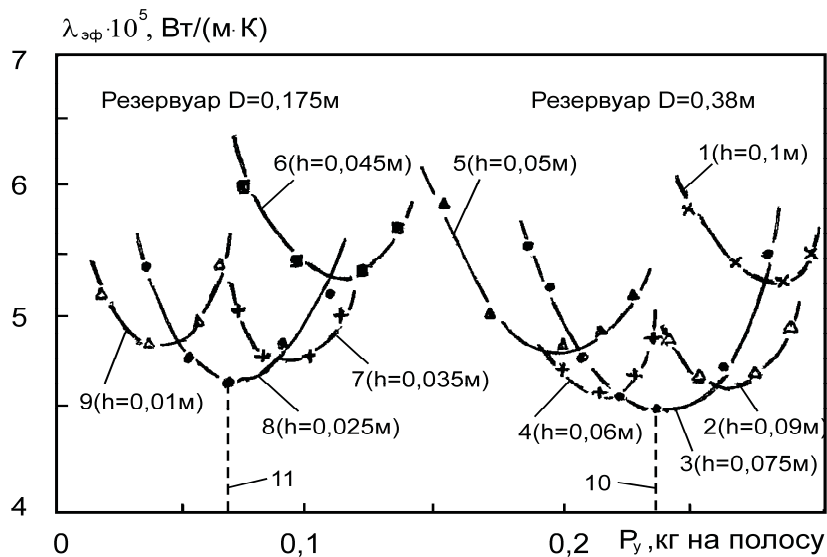


Рис. 1. Зависимость теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для композиции ЭВТИ из ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 от монтажных усилий натяжения (P_y), ширины ее раскрытия на полосы (h) и диаметра (D) внутреннего изолируемого резервуара на криососудах с жидким азотом: 1–5 – зависимости $h(P_y)$ для криососудов с резервуарами диаметром 0,38 м; 6–9 – зависимости $h(P_y)$ для криососудов с резервуарами диаметром 0,175 м; 10, 11 – оптимальные монтажные усилия натяжения ($P_{y.o.}$) для полос ЭВТИ на резервуарах диаметром 0,38 м и 0,175 м, соответственно

Первоначально для изолирования резервуара диаметром 0,38 м были использованы полосы ЭВТИ шириной $h = 0,1$ м, которые наносились на него с различными монтажными усилиями натяжения P_y , начиная от 0,25 кг/полосу. Полученная в результате зависимость $h(P_y)$ 1 для теплозащитных полос ЭВТИ при $P_y = 0,27$ кг/полосу проходит (как видно из рис. 1) через минимум, соответствующий минимальной теплопроводности $5,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К). Было непонятно, является ли полученная теплопроводность наименьшей для пакета ЭВТИ, смонтированного на криососудах с внутренним резервуаром диаметром 0,38 м. Поэтому для данного криососуда были проведены и другие такие исследования с использованием полос изоляции шириной 0,09, 0,075, 0,06 и 0,05 м, результаты которых представлены на рис. 1 зависимостями $h(P_y)$ 2, 3, 4 и 5, соответственно.

В результате установлено (рис. 1), что оптимальная ширина h_0 полос, на которую необходимо разрезать изоляцию для изолирования, должна составлять 0,075 м. Их необходимо монтировать на резервуаре диаметром 0,38 м с оптимальными усилиями натяжения $P_{y.o.} = 0,23$ кг/полосу. Достигаемая при этом минимальная теплопроводность для ЭВТИ $\lambda_{эф.min} = 4,5 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) лишь на 25–27 % превышает данную характеристику для калориметрических образцов теплоизоляции [2].

Далее аналогичным методом с помощью зависимостей $h(P_y)$ 6, 7, 8 и 9 (рис. 1) были определены оптимальные монтажные параметры для полос ПЭТФ-ДА+УСНТ-10 при изолировании ими криососуда с резервуаром диаметром 0,175 м. Они оказались равными для h_0 (0,025 м) и для P_y (0,7 кг/полосу). Достигнутая при этом минимальная теплопроводность для пакета ЭВТИ, равная $4,6 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), с точностью (2–4) % совпадала с данной характеристикой теплоизоляции, полученной для криососуда с резервуаром диаметром 0,38 м. Из этого следует, что изолирование криососудов различного диаметра одинаковой композицией ЭВТИ с оптимальными монтажными параметрами h_0 и $P_{y.o.}$ обуславливает получение для них одинаковых минимальных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф.min}$.

После этого представило интерес исследовать возможную взаимосвязь (сопряженность) между процессом теплообмена для торцов ЭВТИ с поверхностью горловины и интенсивностью теплообмена внутри нее с парами криоагента посредством механизма теплопроводности через стенку горловины. Предполагается, что от эффективности

сопряженного теплообмена должна зависеть степень использования охлаждающего эффекта паров криоагента в криососуде.

Процесс теплообмена внутри горловины с холодными парами криоагента исследовался на пяти локальных кольцевых участках (поверхностью ΔF) при различных температурах по высоте неизотермической горловины по методике и на установке, описанной в работе [3]. Величина локального коэффициента теплопроводности (α_l) на участках горловины определялась по уравнению [4]:

$$\alpha_l = \frac{Q_l}{\Delta F \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где Δt – разность температур между стенкой горловины и потоком хладагента в центре горловины на каждом локальном участке. При этом тепловой поток Q_l для них находился из соотношения [4]:

$$Q_l = \frac{\lambda_{cp} \cdot \Delta F \cdot \Delta T}{\delta}, \quad (2)$$

где λ_{cp} – средняя теплопроводность материала горловины в поперечном сечении на участке горловины;

ΔT – перепад температуры по толщине стенки горловины на участке;

δ – толщина горловины.

Из полученных локальных коэффициентов теплообмена α_l определялась среднеинтегральная величина данного параметра α для всей горловины криососуда.

В настоящей работе взаимосвязь между процессами теплообмена внутри горловины и на ее поверхности с слоями теплоизоляции исследовалась в виде зависимости коэффициента теплообмена α от монтажных усилий натяжения $\alpha(P_y)$, с которыми торцы полос ЭВТИ оптимальной ширины раскроя h_o прижимались к поверхности горловины при изолировании. Полученные таким способом результаты представлены на рис. 2.

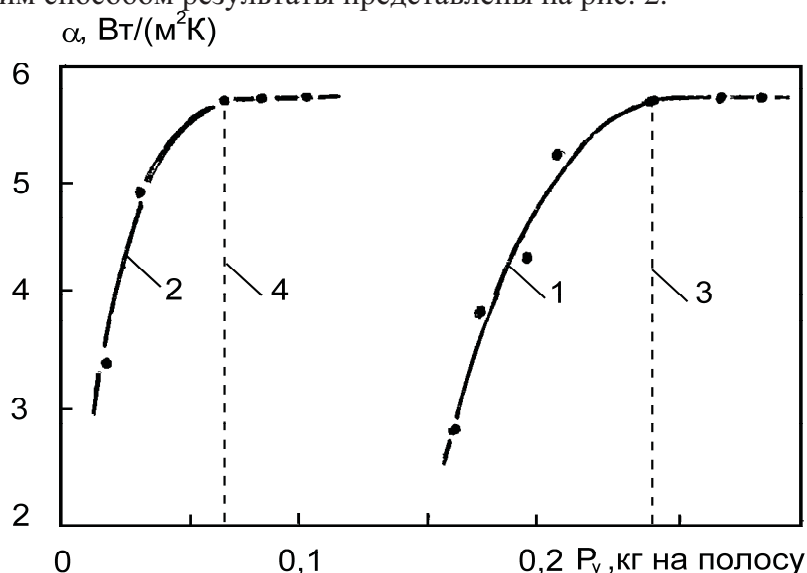


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплообмена внутри горловины криососуда с парами азота (α) от монтажных усилий натяжения (P_y), с которыми торцы полос ЭВТИ оптимальной ширины раскроя (h_o) прижимались к поверхности горловины: 1, 3 и 2, 4 – результаты для криососудов с резервуарами диаметром 0,38 м и 0,175 м, соответственно; 1, 2 – зависимости $\alpha(P_y)$; 3, 4 – оптимальные монтажные усилия натяжения для торцов полос оптимальной ширины раскроя (h_o), равной 0,075 м и 0,025 м, соответственно.

Анализ представленных на рис. 2 результатов показывает, что характер полученных зависимостей $\alpha(P_y)$ для обоих криососудов одинаковый. С повышением монтажных усилий натяжения P_y (что обуславливает интенсификацию процесса теплообмена торцов ЭВТИ с наружной поверхностью горловины) коэффициент теплообмена внутри горловины с парами криоагента α также увеличивается. Он достигает максимального значения $\alpha_{max} = 5,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при оптимальных монтажных усилиях натяжения $P_{y.o.}$ для полос ЭВТИ, равных (как было установлено выше) $0,23 \text{ кг}/\text{полосу}$ для резервуара диаметром $0,38 \text{ м}$ и $0,07 \text{ кг}/\text{полосу}$ для резервуара диаметром $0,175 \text{ м}$. При более высоких (чем $P_{y.o.}$) значениях монтажных усилий натяжения достигаемые коэффициенты теплообмена α_{max} (как видно из зависимостей $\alpha(P_y)$ 1 и 2 на рис. 2) остается неизменным.

Выше отмечалось, что эффективность теплозащиты различных криоустройств в значительной степени зависит от использования в них охлаждающего эффекта паров криоагентов \mathcal{E}_x для уменьшения суммарных теплопритоков. Осуществляется данный сопряженный процесс в результате продольного переноса тепла по полосам металлизированных экранов из пакетов ЭВТИ к их контактам с поверхностью горловины, а затем через них и ее стенку (за счет теплопроводности) к холодным парам криоагента внутри за счет механизма теплообмена. В связи с этим представило интерес исследовать взаимосвязь между интенсивностью теплообмена в горловине с парами криоагента α и степенью их использования в криососуде, который определяется согласно соотношения:

$$\mathcal{E}_x = (\Pi/\Pi_T) \cdot 100, \% \quad (3)$$

где Π_T – теоретический параметр, характеризующий степень уменьшения теплопритоков в криососуде, в результате использования холода паров криоагентов. Для жидкого N_2 , H_2 и He данный параметр равен $1,7$, 5 и 45 , соответственно [5].

Параметр Π определяет реальную степень снижения теплопритоков в криососуде, который рассчитывается из уравнения:

$$\Pi = Q_{\Sigma.o.}/Q_{\Sigma.b.o.} \quad (4)$$

где $Q_{\Sigma.o.}$, $Q_{\Sigma.b.o.}$ – суммарные теплопритоки в криососуде при использовании и не использовании в них холода паров криоагентов, соответственно.

Результаты исследования зависимости $\mathcal{E}_x(\alpha)$ для криососуда с жидким N_2 представлены на рис. 3.

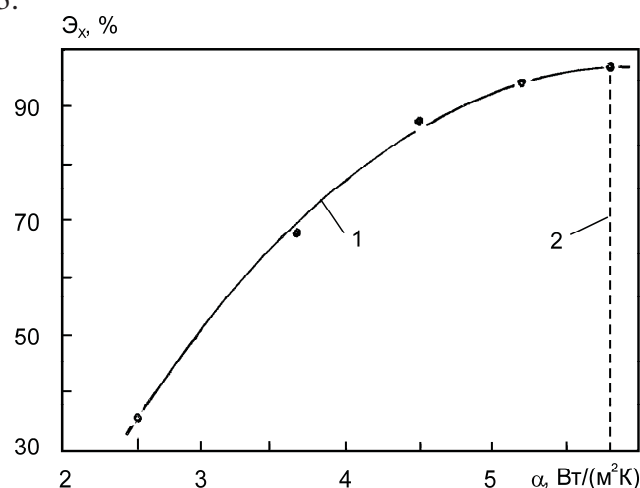


Рис. 3. Исследование зависимости степени использования холода паров (\mathcal{E}_x) жидкого азота в криососуде от интенсивности теплообмена (α) в горловине: 1 – зависимость $\mathcal{E}_x(\alpha)$; 2 – максимальная величина теплообмена с парами азота (α_{max}), достигаемая в горловине криососуда.

Из результатов рис. 3 следует, что с повышением интенсивности теплообмена в

горловине с парами азота увеличивается степень использования их холода в криососуде. При достижении максимальной величины коэффициента теплообмена $\alpha_{max} = 5,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ степень использования холода паров N_2 в криососуде достигает $\sim 96\%$ от теоретической $\text{П}_т$. В результате в данном криососуде суммарные теплопритоки от максимального использования охлаждающего эффекта азота уменьшаются в $\sim 1,6$ раза.

Далее в работе была исследована зависимость ресурса работы криососуда (R) с жидким азотом (при разовом заполнении) от монтажных усилий натяжения P_y для его пакетов ЭВТИ, смонтированных полосами оптимальной ширины h_o . В данном случае параметр P_y характеризует эффективность теплообмена смонтированных торцов полос ЭВТИ с поверхностью горловины, а также интенсивность теплообмена внутри нее с парами азота. Исследованная зависимость $R(P_y)$ для криососудов с жидким азотом представлена на рис. 4.

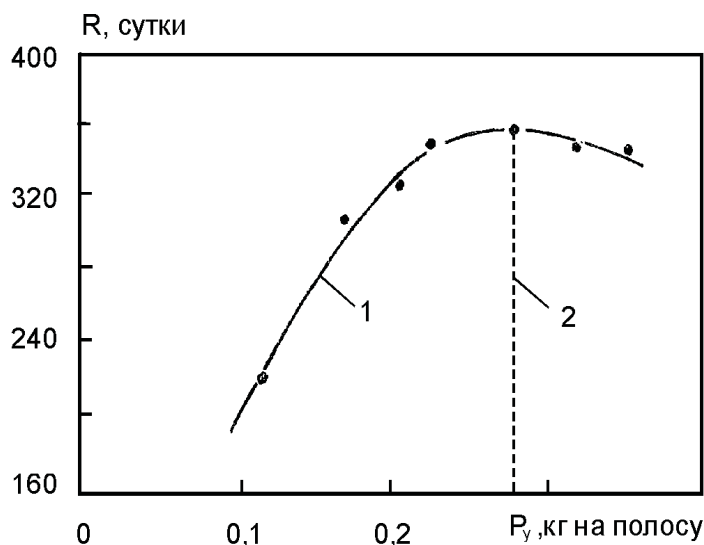


Рис. 4. Зависимость ресурса работы (R) криососуда (емкостью 35 л) с жидким азотом (при разовом заполнении) от монтажных усилий натяжения (P_y), с которыми полосы оптимальной ширины раскроя (h_o) пакетов ЭВТИ смонтированы на его резервуаре: 1 – зависимость $R(P_y)$; 2 – оптимальное монтажное усилие натяжения ($P_{y.o.}$) для смонтированных на резервуаре криососуда полос ЭВТИ

Полученные на рис. 4 результаты свидетельствуют, что с повышением усилий натяжения P_y для полос теплозащиты на криососуде вплоть до оптимального значения $P_{y.o.}$ происходит увеличение его ресурса работы R от уменьшения коэффициента теплопроводности пакета ЭВТИ (зависимости $\lambda(P_y)$ 3 и 8 на рис. 1), а также от возрастания степени использования в нем холода паров для уменьшения суммарных теплопритоков. В случае повышения монтажных усилий натяжения P_y для полос ЭВТИ выше оптимального значения $P_{y.o.}$ происходит уменьшение ресурса работы криососуда (рис. 4) в результате увеличения теплопроводности для его теплоизоляции (см. зависимость $\lambda(P_y)$ 3 и 8, рис. 1).

Выводы

В работе установлено, что эффективность теплозащитных пакетов ЭВТИ на криососудах определяется монтажными усилиями натяжения P_y , шириной раскроя материала теплозащиты на полосы h , а также диаметром D изолируемого резервуара криососуда. При оптимальных значениях данных монтажных параметров $P_{y.o.}$ и h_o достигается минимальная теплопроводность для пакетов ЭВТИ на криососуде, которая только на 24–27 % превышает аналогичную характеристику для их калориметрических образцов.

Установлена взаимосвязь (сопряжение) между процессами теплообмена на наружной поверхности горловины с торцами полос смонтированного пакета ЭВТИ и теплообмена внутри горловины с парами криоагента α посредством механизма теплопроводности через

стенку горловины. С увеличением монтажных усилий натяжения P_u для полос ЭВТИ (что соответствует повышению коэффициента теплообмена торцов теплоизоляции с поверхностью горловины) до оптимального значения $P_{u.0}$ происходит возрастание коэффициента теплообмена α внутри горловины с парами криоагента, степени использования холода паров в криососуде для уменьшения суммарных теплопритоков, а также ресурса работы криососуда R с жидким криоагентом.

Список литературы

1. Жунь Г. Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками / Г. Г. Жунь // Межвузовский сборн. научн. трудов. Процессы и аппараты криогенных технологий и кондиционирования. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С. 59–65.
2. Жунь Г. Г. Разработка высокоэффективной комбинированной композиции ЭВТИ / Г. Г. Жунь // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 106. – С. 75–79.
3. Жунь Г. Г. Теплообмен в азотных криососудах с широкой горловиной / Г. Г. Жунь, В. Ф. Гетманец, П. Н. Юрченко // Инж.-физ. журнал. – 1988. – Т. 55, № 3. – С. 502.
4. Пастухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах / Б. С. Пастухов. – М.: Энергия. – 1967. – 562 с.
5. Zhun' G. G. A shieldless method for cryogenic cold-vapor supply usage: Theory and practice / G. G. Zhun', V. F. Getmanets, R. S. Michalchenko // Cryogenics. – 1999. – N 39. – P. 985–987.

STUDY OF COUPLED HEAT EXCHANGE IN CRYOVESSELS

G. G. ZHUN', Dr. Sci. Tech.

The paper is devoted to study of processes of heat exchange between cryogenic agent within the vessel neck and the neck-wall connected ends of mounted superinsulation sheets. These processes determine efficiency of the cryovessel construction as a whole.

Поступила в редакцию 22.05 2012 г.