

УДК 536.21: 536.48

Г. Г. ЖУНЬ, доктор техн. наук

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С НОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Работа посвящена разработке метода повышения эффективности теплозащитных пакетов ЭВТИ для криоустройств путем использования в них новых композиционных прокладочных изоляционных бумаг из волокон различных материалов.

Робота присвячена розробці методу підвищення ефективності теплозахисних пакетів ЕВТИ для криопристроїв шляхом використання в них нових композиційних прокладкових ізоляційних паперів із волокон різних матеріалів.

Введение

В настоящее время во многих областях науки и техники широко используются криогенные температуры и ожиженные газы. Для их хранения и использования применяются различные криососуды, криоемкости и криостаты с теплоизоляцией из слоев экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которая на калориметрах имеет самую низкую теплопроводность. Первая отечественная такая ЭВТИ изготавливалась из слоев экранной металлизированной пленки ПЭТФ-ДА и прокладочной стекловуали ЭВТИ-7, состоящей из стеклянных волокон, соединенных клеем ПВА.

Все криоустройства в процессе изготовления подвергаются длительной откачке (в течение 7–10 суток) с нагревом до 380–390 К с целью дегазации материалов теплозащиты. В результате данного процесса происходит размягчение клеевой основы в стекловуале ЭВТИ 7, что приводит к склеиванию слоев теплоизоляции и увеличению ее теплопроводности ($\lambda_{эф}$) в 11–13 раз в сравнении с калориметрическими образцами [1].

В связи с этим для пакетов ЭВТИ стали изготавливать новые прокладочные изоляционные материалы по бумагоделательной технологии "мокрым" способом (без клея) из целлюлозных (Ц), лавсановых (Л), базальтовых (Б), вискозных (В), хлопковых (Х) и других волокон. Изготовленная данным методом, например, прокладочная бумага СНТ-10 (состоящая из 70 % Ц и 30 % Л волокон) оказалась прочной, что позволяет ее легко разрезать на порезочном устройстве на полосы для машинного изолирования ими криососудов. Для улучшения тепловых характеристик криососудов следовало установить оптимальный композиционный состав новых прокладочных материалов для их пакетов ЭВТИ. С этой целью на основе изоляции СНТ-10 было изготовлено несколько модификаций прокладочных бумаг, путем введения в ее состав по 5 % волокон различных материалов.

Целью работы является исследование зависимости от композиционного состава характеристик прокладочных бумаг, а также пакетов ЭВТИ с ними на криососудах с жидким азотом.

Основное содержание

Все опытные криососуды с исследуемыми новыми прокладочными материалами в пакетах ЭВТИ изготавливались по одинаковой технологии. Она обеспечивала достижение в пакетах ЭВТИ оптимального вакуума ($P_0 \leq 10^{-3}$ Па), что исключало в них теплоперенос по газовой составляющей. Тепловые испытания изготовленных опытных криососудов проводились на экспериментальном стенде [1]. Из полученных результатов определялась эффективная теплопроводность ($\lambda_{эф}$) пакетов ЭВТИ согласно соотношения:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{Q_u \cdot \delta_u}{F_c \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

где Q_u – тепловой поток через пакет ЭВТИ криососуда;

δ_u – среднеинтегральная толщина пакета теплоизоляции на криососуде (равная 0,071 м);

F_c – средняя поверхность пакета теплоизоляции на криососуде (составляющая 0,86 м²);

ΔT – перепад температуры между теплой и холодной стенкой в криососуде.

Для всех исследуемых изоляционных прокладок определялись удельная поверхность (S_y) по емкости (α_m) молекул H₂O в адсорбированном на их поверхности монослое (из результатов вакуумно-десорбционных исследований [2]) по уравнению [3]:

$$S_y = \alpha_m \cdot \omega_o \cdot N, \quad (2)$$

где ω_o – посадочная площадка для молекул H₂O в монослое;

N – число Авогадро.

В процессе испытаний новых прокладочных материалов изучалось также достигаемое давление (P) в слоях пакетов ЭВТИ криососудов на экспериментальном стенде, описанном в работе [4].

В настоящей работе приведены результаты исследования в пакетах ЭВТИ четырех новых композиционных прокладочных материалов, изготовленных на основе теплоизоляции СНТ-10, путем введения в ее состав по 5 % волокон из углерода (У), термалена (Т), ацетохлорина (А) и фенилона (Ф), которые характеризуются развитой удельной поверхностью. В результате были созданы следующие новые композиционные прокладочные материалы: УСНТ-10 (состоящий из 65 % Ц + 30 % Л + 5 % У), ТСНТ-10 (из 65 % Ц + 30 % Л + 5 % Т) и другие, составы которых представлены в табл. 1. В таблице также приведены данные, полученные для новых прокладочных материалов и улучшенной стекловуали ЭВТИ-7 (для сравнения), которая перед использованием подвергалась предварительной термовакуумной дегазации для удаления клеевой основы.

Таблица 1

Характеристики новых композиционных прокладочных материалов, а также пакетов ЭВТИ с ними (их теплопроводности ($\lambda_{\text{эф}}$) и ресурс работы (R)) на криососудах (емкостью 35 л) с жидким азотом

№ п/п	Прокладочный изоляционный материал и его состав	Удельная поверхность прокладок S_y , м ² /кг	Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Ресурс работы криососуда с жидким N ₂ R,сутки
1	Стекловуаль ЭВТИ-7 (без клея), изготавливается из стеклянных волокон	528	8,8-9,3	246-262
2	СНТ-10, состоит из 70% Ц + 30% Л	531	4,5-4,8	345-358
3	УСНТ-10, из 65% Ц + 30% Л + 5% У	617	4,0-4,3	365-378
4	ТСНТ-10, из 65% Ц + 30% Л + 5% Т	602	4,7-5,0	340-343
5	АСНТ-10, из 65% Ц + 30% Л + 5% А	579	5,4-5,7	312-328
6	ФСНТ-10, из 65% Ц + 30% Л + 5% Ф	558	6,4-6,7	293-302

Из результатов табл. 1 следует, что использование в пакетах ЭВТИ улучшенной стекловуали ЭВТИ-7 позволяет понизить их теплопроводность с $(34-39,5) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) до $(8,8-9,3) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) (в 3,9-4,2 раза) и, в результате, увеличить ресурс работы криососудов (R) при разовом заполнении их жидким азотом с ~100 суток до ~250 суток (табл. 1).

Применение в пакете ЭВТИ вместо стекловуали ЭВТИ-7 новой прокладочной бумаги СНТ-10 позволяет уменьшить теплопроводность в ~2 раза (до $(4,5-4,8) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) и увеличить ресурс работы криососуда до ~350 суток.

Использование в пакете ЭВТИ прокладочной бумаги УСНТ-10 с волокнами углерода, которая имеет в сравнении с СНТ-10 на ~16 % большую удельную поверхность (равную $617 \text{ м}^2/\text{кг}$), обуславливает получение в его слоях в 4-5 раз меньшего давления. Это следует из сравнения зависимостей $P(x/\delta)$ 2 и 3 для пакетов ЭВТИ с прокладками СНТ-10 и УСНТ-10, соответственно, представленных на рис. 1. Понижение давления в слоях пакета ЭВТИ с бумагой УСНТ-10 способствует уменьшению теплопереноса по молекулярной составляющей и, как следствие, коэффициента теплопроводности до $(4,0-4,3) \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ (на ~12 %) (табл. 1).

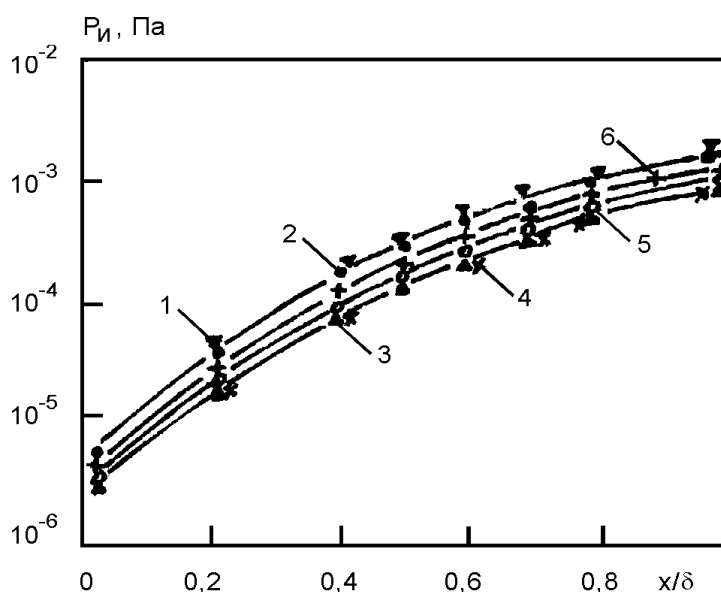


Рис. 1. Изменение давления (P) по среднеинтегральной приведенной толщине (x/δ) слоев в пакете ЭВТИ с различными прокладочными материалами на криососуде с жидким азотом: 1 – прокладка из стекловуали ЭВТИ-7 без клеевой основы; 2, 3, 4, 5, 6 – прокладочные материалы СНТ-10, УСНТ-10, ТСНТ-10, АСНТ-10 и ФСНТ-10, соответственно.

Адсорбционной способностью обладают также, как отмечалось выше, волокна термалена. Прокладочный материал с ним (ТСНТ-10) имеет близкую к УСНТ-10 удельную поверхность, равную $602 \text{ м}^2/\text{кг}$ табл. 1). Это позволяет получать в слоях пакетов ЭВТИ с прокладками из ТСНТ-10 близкое к УСНТ-10 давление, что следует из сопоставления зависимостей $P(x/\delta)$ 3 и 4 на рис. 1. Однако теплопроводность пакетов ЭВТИ с прокладочной бумагой ТСНТ-10 (равная $(4,7-5,0) \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹) оказалась на ~17 % более высокой в сравнении с теплоизоляцией с прокладками из УСНТ-10 (табл. 1). Причиной этого оказался более темный цвет прокладки ТСНТ-10, что обуславливает повышенный (в сравнении с УСНТ-10) вклад лучистой составляющей суммарного теплопритока в пакете ЭВТИ с данной бумагой.

Далее были исследованы изоляционные материалы с ацетохлорином (бумага АСНТ-10) и фенилоном (прокладка ФСНТ-10), которые в сравнении с СНТ-10 имеют, соответственно, на 9 % и 5 % большую удельную поверхность (табл. 1). Их использование в слоях пакета ЭВТИ позволило получать также более низкое давление в сравнении с СНТ-10, что следует из сравнения зависимостей $P(x/\delta)$ 5 и 6 с $P(x/\delta)$ 2 на рис. 1. Однако, несмотря на это, теплопроводность пакетов ЭВТИ с прокладками АСНТ-10 и ФСНТ-10 оказались на ~20% и на ~42 %, соответственно, выше, чем для изоляции с бумагой СНТ-10 (табл. 1). Причиной этого также оказался более темный цвет прокладок АСНТ-10 и ФСНТ-10 в сравнении с бумагой СНТ-10.

При проектировании и расчетах различных криоустройств необходимы данные о

температурных зависимостях теплопроводности $\lambda(T)$ для наиболее эффективных пакетов ЭВТИ. Такие данные в литературе отсутствуют. В настоящей работе приведены данные результаты для трех пакетов ЭВТИ с наиболее эффективными прокладочными материалами СНТ-10, УСНТ-10 и ТСНТ-10 для диапазона от 4 К до 294 К, которые представлены на рис. 2. Исследовались данные зависимости $\lambda(T)$ по методике, описанной в работе [5].

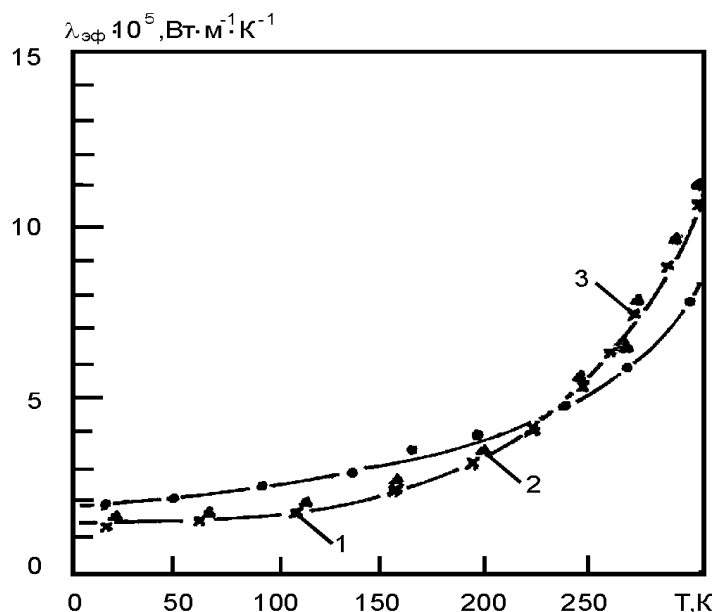


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности $\lambda_{эф}(T)$ для пакетов ЭВТИ с новыми прокладочными материалами на криососудах в диапазоне температур от 4 К до 294 К: 1 – изоляционная композиция из слоев ПЭТФ-ДА + УСНТ-10; теплоизоляция ПЭТФ-ДА + ТСНТ-10; 3 – слои ПЭТФ-ДА + СНТ-10.

Представленные на рис. 2 результаты могут быть использованы в расчетах в виде описывающего зависимости $\lambda_{эф}(T)$ 1, 2, 3 полинома:

$$\lambda_{эф}(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 . \tag{3}$$

Значения коэффициентов a, b, c и d данного полинома для изоляций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов полинома (3)

Номер зависимости $\lambda_{эф}(T)$ на рис. 2, описываемой полиномом (3)	a	b·10 ²	c·10 ⁴	d·10 ⁷
1	1,046	1,233	-1,357	6,587
2	1,053	1,362	-1,261	6,693
3	-0,3025	3,897	-2,142	5,752

Из полученных экспериментальных зависимостей $\lambda_{эф}(T)$ 1-3 были определены среднеинтегральные значения теплопроводности $\lambda_{эф}$ для трех интервалов температур (ΔT): 78-294 К, 20-78 К и 5-294 К. Они необходимы для расчета криосистем. Полученные таким образом результаты представлены в табл.3.

Таблица 3

Среднеинтегральные теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для пакетов ЭВТИ на криососудах в различных температурных интервалах (ΔT).

Температурный интервал ΔT , К	Среднеинтегральные значения теплопроводности $\lambda_{эф} \cdot 10^5$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹		
	№ зависимости $\lambda_{эф}(T)$ на рис. 2 и состав пакета ЭВТИ		
	№1, ПЭТФ-ДА+УСНТ-10	№2, ПЭТФ-ДА+ТСНТ-10	№3, ПЭТФ-ДА+СНТ-10
5-294	3,3	3,4	3,7
20-294	3,5	3,6	4,0
78-294	4,0	4,1	4,5

Анализ результатов табл. 3 показывает, что в интервале 5-294 К и 20-294 К теплопроводности $\lambda_{эф}$ для одной и той же теплоизоляции имеют, соответственно, на 20-22 и 12-14 % меньшие значения в сравнении с интервалом 78-20 К. Объясняется это тем, что при водородных и гелиевых температурах значения параметра $\lambda_{эф}$ уменьшается интенсивнее в сравнении с увеличенным для них диапазоне температур.

Выводы

Проведенные исследования позволили установить, что использование в пакетах ЭВТИ на криососудах вместо стекловуали ЭВТИ-7 с клеевой основой новой композиционной прокладки СНТ-10 (изготавливаемой из целлюлозных и лавсановых волокон без использования клея) дало возможность уменьшить их теплопроводность с $(35-40) \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ до $\sim 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, то есть в 8-9 раз. Дальнейшее улучшение тепловых характеристик пакетов ЭВТИ достигается также применением в них прокладочной бумаги УСНТ-10, изготавливаемой на основе изоляции СНТ-10 с добавлением 5 % волокон углерода. Данная бумага имеет на ~ 16 % большую адсорбционную поверхность. Это способствует уменьшению в слоях ЭВТИ давления газов (в 4-5 раз) и максимального теплопереноса, а также коэффициента их теплопроводности $\lambda_{эф}$ до $\sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (на ~ 13 %).

Использование в пакетах ЭВТИ на криососудах прокладочных материалов с волокнами из термалена, ацетохлорина и фенилона, характеризующихся развитой адсорбционной поверхностью, не позволило уменьшить их теплопроводность, вследствие повышенной черноты данных материалов.

Из полученных результатов следует, что использование в пакетах ЭВТИ композиционных прокладочных материалов является перспективным направлением улучшения тепловых характеристик. Поэтому необходимо дальнейшее исследование прокладочных материалов различного композиционного состава для выявления наиболее эффективных.

Список литературы

1. Жунь Г. Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками / Г. Г. Жунь, А. Г. Подольский, В. И. Шалаев // Межвузовский сборник научных трудов: Процессы и аппараты криогенной техники и кондиционирования воздуха. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С. 55-64.
2. Жунь Г. Г. Исследование десорбционно-диффузионных процессов вакуумирования и газоотделения материалов / Г. Г. Жунь // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1998. – Вып. 1(2). – С. 14-21.
3. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев // М.: Химия, 1976. – 512 с.
4. Жунь Г. Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов / Г. Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування. – 1998. – № 43 (110). – С. 43-51.
5. Жунь Г. Г. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов / Г. Г. Жунь, В. Ф. Гетманец, А. В. Мирошниченко // Инж.-физ. журнал. – 1989. – Т. 56, №2. – С. 271-276.

STUDY OF THERMAL SUPERINSULATION WITH NEW MATERIALS

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

The paper is devoted to development of a method to enhance efficiency of thermal shielding superinsulation packets for cryogenic equipment by exploiting new composite paperlike insulator spacers made from a mixture of fibers of different materials.

Поступила в редакцию 06.06 2012 г.