

М 4772-59
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Мильман Сергей Борисович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ
ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОГО, РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО
И КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

05.04.03 – Машины и аппараты холодильной и криогенной
техники и систем кондиционирования

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1988

217

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте гелиевой техники.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор М.Г.Каганер

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор М.И.Киселев
кандидат технических наук,
доцент А.Б.Грачев

Ведущая организация:

Физический институт
им. П.Н.Лебедева АН СССР

Защита состоится "17" октября 1988 г. в 16 час. 00 мин.
на заседании Специализированного совета К.053.15.07
Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 2.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
Специализированного
кандидат технич

М 477299

Актуальность работы. Развитие целого ряда отраслей науки и народного хозяйства тесно связано с широким использованием низких температур. В связи с этим вопросы совершенствования изоляционных систем и повышения эффективности криогенного оборудования, в частности, предназначенного для хранения и транспортирования сжиженных газов, являются весьма актуальными. Реализация указанных задач существенно затрудняется отсутствием четких представлений о роли и взаимосвязи отдельных механизмов теплопереноса в криогенной теплоизоляции, а также ограниченностью и противоречивостью данных по теплофизическим свойствам изоляционных материалов и композиций.

Цель работы состояла в разработке новых более эффективных теплоизоляционных материалов и композиций и повышении качества серийно выпускаемого криогенного емкостного оборудования на основе изучения закономерностей радиационного, радиационно-кондуктивного и контактного теплообмена в различных видах вакуумированной теплоизоляции. В связи с этим необходимо было исследовать влияние оптических свойств дисперсных изоляционных материалов на радиационный теплоперенос, сжимающей нагрузки на величину контактной проводимости изоляционных композиций, температуры и ряда технологических факторов на оптические и электрические характеристики металлических поверхностей.

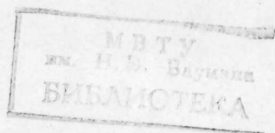
Научная новизна. Впервые получены подробные данные по спектральным полусферическим оптическим свойствам теплоизоляционных материалов и разработана методика перехода к интегральным коэффициентам ослабления излучения этими материалами при любых, в том числе криогенных, температурах источников излучения. Исследован теоретически и экспериментально радиационный и радиационно-кондуктивный теплообмен в порошковой (ВПИ), волокнистой (ВВИ) и многослойной (ВМИ) теплоизоляциях и получены более точные зависимости для расчета их коэффициентов радиационной проводимости. Показаны существенное влияние прокладочных материалов на теплоперенос излучением в ВМИ и возможность подбора этих материалов посредством изучения их оптических свойств.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1477299

Мильман С.Б. Совершенства



M 477299

Полученные данные позволили разработать новые более эффективные прокладочные материалы на основе базальтовых и синтетических волокон.

Впервые выполнено непосредственное экспериментальное исследование закономерностей контактного теплообмена в различных видах изоляции. Получены эмпирические зависимости, позволяющие проводить качественную и количественную оценку контактной проводимости изоляции.

Впервые получена эмпирическая зависимость, позволяющая определять поглощательную способность металлов с оптически гладкой поверхностью в интервале температур 4,2+293 К по величине их удельного электросопротивления при соответствующей температуре без проведения сложных и длительных калориметрических измерений. Получены новые данные по температурным зависимостям поглощательной способности реальных металлических поверхностей.

Впервые измерены температурные зависимости коэффициента теплопроводности ряда новых эффективных текстур В.И. при их монтаже методом орбитальной намотки.

Практическая ценность работы определяется тем, что использование полученных в ней зависимостей, экспериментальных данных и рекомендаций позволило разработать новые более эффективные теплоизоляционные материалы и композиции; обеспечить серийный выпуск гелиевого емкостного оборудования и криогенных камер К-1000 на Московском экспериментальном заводе гелиевого машиностроения (МЭЗГМ); разработать и организовать на Коростенском заводе химического машиностроения промышленное производство типоразмерного ряда сосудов для сельского хозяйства типа СДС с повышенной длительностью хранения жидкого азота.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзном семинаре "Научно-технические проблемы криогенной техники и кондиционирования" (Москва, МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1979 г.); на XXI Всесоюзном совещании по физике низких температур (Харьков, 1980 г.), на IV Всесоюзной конференции по криогенной технике "Криогеника-87" (Москва, 1987 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, одна работа находится в печати.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы из 98 наименований, приложения и включает 203 страницы, в том числе 186 страниц основного текста, содержащего 25 рисунков, 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрено состояние вопроса в области исследований радиационного, радиационно-кондуктивного и контактного теплопереноса в дисперсных средах, в том числе теплоизоляционных материалах, и оптических свойств металлических поверхностей при низких температурах.

На основании анализа опубликованных работ показаны отсутствие единой точки зрения в вопросах о взаимодействии механизмов теплопереноса и роли изоляционных материалов в радиационном теплообмене в изоляции; отсутствие методов экспериментальной оценки собственно контактной проводимости изоляции, а также ограниченность и противоречивость данных по оптическим свойствам металлов, применяемых в качестве экранов и отражающих тепловое излучение покрытий в ВМИ и высоковакуумной (ВИ) изоляции, при низких температурах. Сформулированы задачи исследования.

Вторая глава содержит описание примененных в диссертационной работе экспериментальных установок для исследования радиационного и контактного теплопереноса в изоляции и поглощательных способностей металлов, изложение методик проведения экспериментов в данной работе, а также анализ погрешностей.

Изучение радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена в ВПИ, ВВИ и ВМИ осуществлялось на основе исследования оптических свойств дисперсных изоляционных материалов методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. Особенностью примененной аппаратуры являлась возможность измерения в ИК области спектра полусферических, т.е. с учетом рассеяния, спектральных коэффициентов пропускания и отражения излучения исследуемыми материалами, что обеспечивалось использованием специальных оптических приставок к монохроматорам.

Оптические характеристики изоляционных материалов (альбедо рассеяния ω , оптическая толщина τ_0 , коэффициенты поглощения

α и рассеяния σ) определялись по результатам измерения пропускания слоев единичной толщины D и отражения оптически бесконечно толстых слоев R_∞ с помощью формул:

$$D = \frac{A_1(1 + \exp(-\tau_0)) - A_1 \exp(-k\tau_0) - a[A_2 \exp(-\tau_0) - A_1 \exp(-k\tau_0)][\exp(k\tau_0) - \exp(-k\tau_0)]}{\exp(k\tau_0) - a^2 \exp(-k\tau_0)}, \quad (1)$$

$$R_\infty = \frac{\omega}{4(1 - 1,6\omega)} \left[\frac{3(2k - 3)}{3 + 2k} + 0,6 \right], \quad (2)$$

где $A_{1,2} = \frac{\omega}{4(1 \mp 2/3)(1 - 1,6\omega)}$; $a = \frac{1-k}{1+k}$; $k = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1-\omega}{1-0,25\omega}}$;
 $\omega = \sigma/(\alpha + \sigma)$; $\tau_0 = \delta \ell$; $\delta = \alpha + \sigma$; ℓ - толщина слоя.

Для исследования контактной теплопроводности изоляции использовался метод электротепловой аналогии (ЭТА). Была разработана экспериментальная установка, позволявшая измерять объемное электрическое сопротивление плоского слоя изоляции (пропорциональное его термическому сопротивлению) при изменяющейся механической нагрузке на него.

Измерения интегральных полусферических поглощательных способностей металлических поверхностей проводились радиационным методом с помощью промышленного терморациометра ТИС при 293 К и калориметрическим методом на шаровом сосуде с охлаждаемым экраном при низких температурах.

Максимальные погрешности измерений составляли 15 % при исследовании спектральных оптических свойств дисперсных материалов и поглощательных способностей металлов при низких температурах и 6 % при измерениях объемного электросопротивления.

В третьей главе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена в порошковой, волокнистой и многослойной теплоизоляции. Проведено измерение коэффициентов пропускания и отражения излучения порошковыми и волокнистыми изоляционными материалами. Надежность экспериментальных данных подтверждена их хорошим согласованием с выводами теории рассеяния света отдельными частицами.

Разработана методика определения интегральных полусферических коэффициентов ослабления излучения по результатам спектрофотометрического эксперимента для любых, в том числе криогенных, температур источников излучения.

С использованием зависимости

$$\lambda_p = \frac{16 \sigma_0 T_p^3}{3 \gamma} \quad (3)$$

где $T_p = \sqrt[3]{(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)/4}$ - эффективная температура радиационного теплопереноса; γ - интегральный полусферический коэффициент полного ослабления; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана; T_1, T_2 - граничные температуры, выполнены расчеты коэффициентов радиационной проводимости ряда композиций ВПИ (таблица 1) и ВВИ (таблица 2).

Таблица 1

Интегральные оптические свойства и коэффициенты радиационной проводимости ВПИ при 90-300 К.

Материал	Плотность, кг/м ³	$\alpha \cdot 10^{-3}$	$\sigma \cdot 10^{-3}$	$\gamma \cdot 10^{-3}$	λ_p , мкВт/(смК)	
		1/м	1/м	1/м	(3)	Калорим. метод
Перлитовая пудра	100	1,2	2,0	3,2	9,1	9-10
Аэрогель (А)	100	1,2	1,8	3,0	9,7	10-13
А + 20 % масс.ВПИ	130	1,8	2,7	4,5	6,5	5-6
А + 40 % масс.ВПИ	170	2,7	6,7	9,4	3,1	2-2,5

Полученные результаты с точностью 3-10 % согласуются с величинами λ_p , найденными калориметрическим методом М.Г.Каганером для ВПИ и автором для ВВИ. При заметных расхождениях более надежными следует считать результаты, полученные оптическим методом. Показано, что радиационная и кондуктивная составляющие общего теплопереноса в оптически толстых слоях ВПИ и ВВИ вдали от границ среды подчиняются закону аддитивности. При этом вклад λ_p в величину $\lambda_{эф}$ составляет около 90 %.

Выполнено приближенное аналитическое решение задачи сложного радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое излучающей, поглощающей и изотропно рассеивающей среды, заключенной между диффузно отражающими граничными поверхностями с постоянными температурами. Исходная система интегро-дифференциальных уравнений

Таблица 2

Интегральные оптические свойства и коэффициенты
радиационной проводимости ВВИ при 90-300 К.

Материал	Плот- ность см ⁻¹	ω	τ_0	αl	σl	λ_p , мкВт/(смК)	
						(3)	Калорим. метод
Стеклобумага СБР-М-40	19	0,61	0,936	0,365	0,571	12,9	13,7
Стеклохолст ЭВТИ-15	8	0,54	0,851	0,391	0,460	40,8	44,0
Целлюлозная бумага ОДП	38	0,64	1,46	0,526	0,936	7,2	8,7
Нетканый лавсан	4	0,58	1,30	0,546	0,754	56,2	57,0

$$\left. \begin{aligned} M \frac{dJ(M, \tau)}{d\tau} &= -J(M, \tau) + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^{+1} J(M', \tau) dM' + (1-\omega) \frac{\sigma_0 T^4}{\pi} \\ \frac{d}{dx} \left[-\lambda_T \frac{dT}{dx} + 2\pi(1-\omega) \int_{-1}^{+1} J(M, x) M dM \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

с помощью предложенного М.Г.Каганером модифицированного метода дискретных ординат сводится к системе трех нелинейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{3} \frac{dJ_1}{d\tau} &= -J_1 + \frac{3\omega}{2(4-\omega)} (J_1 + J_2) + \frac{1-\omega}{4-\omega} \cdot \frac{4Ki}{\pi} \theta^4, \\ -\frac{2}{3} \frac{dJ_2}{d\tau} &= -J_2 + \frac{3\omega}{2(4-\omega)} (J_1 + J_2) + \frac{1-\omega}{4-\omega} \cdot \frac{4Ki}{\pi} \theta^4, \\ \frac{d^2\theta}{d\tau^2} &= -\frac{6\pi(1-\omega)}{4-\omega} (J_1 + J_2) + \frac{3(1-\omega)}{4-\omega} 4Ki \cdot \theta^4, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где J — интенсивность излучения; $\theta = T/T_1$; T_1 — температура при $\tau = 0$; $Ki = \sigma_0 T_1^3 / (\lambda_T \delta)$ — число Киричева; λ_T — коэффициент теплопроводности твердого тела.

Решение системы (5) найдено в работе путем линеаризации уравнений с помощью подстановки

$$\theta^4 \approx 1 + (\theta_2^4 - 1) \tau / \tau_0. \quad (6)$$

и последующего интегрирования при граничных условиях

$$\begin{aligned}\tau=0: \theta=1; J_1(0) &= \varepsilon \frac{K_i}{\sigma} + (1-\varepsilon) J_2(0), \\ \tau=\tau_0: \theta=\theta_2; J_2(\tau_0) &= \varepsilon \frac{K_i}{\sigma} \theta_2^4 + (1-\varepsilon) J_1(\tau_0),\end{aligned}\quad (7)$$

где ε — степень черноты граничных поверхностей. Получена приближенная аналитическая зависимость для удельного теплового потока в виде

$$\psi = \frac{1-\theta_2}{\tau_0} + \frac{4}{3} K_i \frac{1-\theta_2^4}{\tau_0} E, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}E &= 1 - \frac{1+z}{3\tau_0} \frac{A_0^{-1}[(z-B_2)A_0^{-1}-(1-zB_2)](1+B_1)(1-A_0)+}{(1-zB_1)(z-B_2)A_0^{-2}-} \dots \\ &\dots \rightarrow \frac{+[(1+zB_1)A_0^{-1}-(z-B_1)](1+B_2)(1-A_0^{-1})}{-(1-zB_2)(z-B_1)}; \quad z=1-\varepsilon;\end{aligned}$$

$$A_0 = \exp(3\tau_0 \sqrt{\frac{1-\omega}{4-\omega}}); \quad B_{1,2} = \frac{8-5\omega \pm 4\sqrt{(1-\omega)(4-\omega)}}{3\omega};$$

$$\ell = \tau_0/\gamma; \quad \psi = q/(\lambda \gamma T_1).$$

Корректность выражения (8) подтверждена сопоставлением его с известными аналитическими решениями для предельных случаев чисто поглощающих, чисто рассеивающих и прозрачных сред, а также с результатами выполненных автором непосредственных калориметрических измерений для двухэкранных систем.

Впервые на основе надежных экспериментальных данных по оптическим свойствам поглощающе-рассеивающих материалов показано их существенное влияние на величину кажущегося радиационного теплового потока q_p , усиливающееся с понижением ε граничных поверхностей (таблица 3). Этот вывод важен с практической точки зрения, т.к. показывает целесообразность применения в качестве прокладок ВМИ материалов, сильно рассеивающих тепловое излучение и обладающих минимальным поглощением.

Таблица 3

Влияние оптических свойств граничных поверхностей
и поглощающе-рассеивающих материалов на радиационный
теплоперенос ($T_1 = 170 \text{ K}$, $T_2 = 100 \text{ K}$)

Тип среды	$q_p, \text{ Вт/м}^2$	
	ε	
	1,0	0,015
Рассеивающая ($\omega \rightarrow 1, \tau_0 = 1$)	26,0	0,39
Поглощающая ($\omega = 0, \tau_0 = 1$)	30,0	11,3
Прозрачная ($\tau_0 \rightarrow 0$)	32,0	0,50

Получена формула для эффективного коэффициента теплопроводности БМИ

$$\lambda_{эф} = \lambda_T + \frac{0,45(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\rho \tau_0} \varepsilon, \quad (9)$$

где ρ — плотность укладки изоляции.

Зависимость (9) дает хорошее, с отклонением не более 15 %, согласование с результатами калориметрических измерений при существенно меньшей по сравнению с последними длительности и трудоемкости спектрометрического эксперимента. Установлено, что использование аналитических зависимостей других авторов приводит к получению величин λ_p , в несколько раз отличающихся от экспериментальных (таблица 4).

Показаны возможность подбора прокладочных материалов для БМИ посредством изучения их оптических свойств и перспективность использования лавсановых и базальтовых волокон для изготовления на их основе новых эффективных прокладочных материалов, что было в дальнейшем подтверждено результатами как лабораторных, так и промышленных испытаний (гл. 6).

Таблица 4

ВМИ с экранами из пленки ПЭТ-ДА ($\epsilon = 0,03$)
при 90-300 К.

Прокладочный материал	Плотность укладки, см ⁻¹	λ_{ρ} , мкВт/(смК)				
		Формулы				
		(9)	Steed (аддитив.)	Cazen	Каганер	Калорим. метод
СБР-М-40	25	0,30	0,14	1,30	1,00	0,28
ЭВТИ-15	15	0,57	0,22	2,20	1,50	0,60
ЭВТИ-7	16	0,10	-	-	-	0,15*
СВШС-Т-5,5	20	0,30	-	-	-	0,26*
ОДП	22	0,44	0,15	1,50	1,53	0,45

Примечание: Калориметрические данные получены Н.П.Першиным (*) и М.Г.Великановой.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению методом ЭТА влияния механического сжатия на контактную проводимость теплоизоляционных материалов и композиций.

Измерения, выполненные для листовых волокнистых материалов и изоляционных порошков без металлических добавок подтвердили выявленную ранее калориметрическим методом пропорциональность контактной проводимости объемной плотности изоляции. Введение в порошковую изоляцию бронзовой пудры БПИ приводит к заметному усилению указанной зависимости, которая аппроксимируется прямыми линиями в логарифмических координатах и характеризуется увеличением показателя степени при ρ с 1,36 до 3,14 при увеличении содержания БПИ в смеси с 20 до 40 % масс.

С использованием результатов, полученных методами ИК спектроскопии и ЭТА, рассчитаны зависимости $\lambda_{\Sigma\phi}$ от плотности для аэрогеля и его смесей с БПИ. Показано, что эти зависимости характеризуются наличием минимума, соответствующего оптимальной для данного материала плотности и сдвигающегося в сторону меньших плотностей при увеличении содержания металлического порошка. Указанные результаты позволили дать рекомендации по составу и плотности порошковой изоляции для сосудов с гибкими оболочка-

ми с учетом различных условий ее работы.

Измерены зависимости контактной проводимости ряда композиций ИМИ от сжимающей нагрузки и плотности укладки изоляции и получены соответствующие аппроксимирующие выражения вида

$\lambda_k \sim P^m$ и $\lambda_k \sim \delta^t$, в которых показатели степени имеют значения $m = 0,05-0,11$ и $t = 0,35-0,92$ для стекловолокнистых и базальтового прокладочных материалов и, соответственно, 0,035 и 0,28 для бумаги из смеси вискозных и целлюлозных волокон в сочетании с экранами из ПЭТ пленки.

Установлено, что зависимость собственно контактной теплопроводности ИМИ от нагрузки носит более слабый характер, чем это следует из калориметрических измерений. Полученный результат опровергает сделанный ранее в ряде работ вывод об определяющем влиянии увеличения λ_k на возрастание $\lambda_{эф}$ ИМИ при увеличении ее толщины и плотности монтажа на изделии. Наиболее вероятной причиной указанного выше различия в характере зависимостей λ_k и $\lambda_{эф}$ от нагрузки является, по мнению автора, снижение эффективности экранов в результате перераспределения температур в слое ИМИ при ее обжати и увеличение вследствие этого теплопереноса излучением. Отсюда следует важный практический вывод о нецелесообразности применения ИМИ в качестве несущей изоляции, работающей под действием сжимающей нагрузки в 1 кгс/см^2 в сосудах с гибкими оболочками, справедливость которого была подтверждена результатами испытаний пенопластовой и стекловолокнистой изоляций.

Пятая глава содержит результаты экспериментального исследования при низких температурах интегральных полусферических поглотательных способностей металлических поверхностей в виде фольг и слоев, нанесенных методом термического распыления на полимерные и металлические подложки.

Впервые проведено исследование интегральных поглотательных способностей металлов A_{th} и их удельных электрических сопротивлений ρ в интервале температур 4,2–293 К, выполненные на одних и тех же образцах в зависимости от температуры поверхности, рода металла, его химической чистоты, типа подложки, на которую он нанесен (рис. 1).

Подтверждена существенная зависимость от химической чистоты металла величин A_{th} и ρ , снижающихся с уменьшением содержания

держания примесей.

Показано, что металлизированные ПЭТ пленки, имеющие более высокие значения A_{th} по сравнению с соответствующими массивными металлами, характеризуются и более высокими значениями

9 .

Впервые получена эмпирическая зависимость

$$A_{th} = 69^{0.44}, \quad (10)$$

позволяющая определять величину поглощательной способности металла с оптически гладкой поверхностью при $T = 4,2+293$ К по величине его удельного электросопротивления при соответствующей температуре без проведения сложных и длительных, особенно в условиях вакуума и криогенных температур, calorиметрических измерений.

Полученные данные сопоставлены с результатами расчетов по классической электромагнитной теории и теории аномального скин-эффекта (АСЭ). Показано, что первая дает наибольшее расхождение с экспериментом, увеличивающееся с понижением A_{th} и ρ .

Приведены температурные зависимости поглощательных способностей некоторых технических материалов.

В шестой главе рассмотрено применение результатов настоящего исследования при разработке и модернизации серийного криогенного емкостного оборудования.

Исследования оптических свойств металлов позволили предложить эффективное отражающее покрытие внутренних емкостей гелиевых сосудов и технологию его нанесения на изделия, что обеспечило серийный выпуск гелиевых сосудов типа СТГ, криостатов КГ и цистерн ЦГТ-0,5/0,7 на МЭЗИМ. Указанным изделиям был присвоен Государственный Знак качества. Технология нанесения отражающего покрытия введена в стандарт предприятия и отраслевой стандарт. Фактический экономический эффект от внедрения указанной технологии составил на 1979 г. 271,8 тыс.руб.

На базе исследований, выполненных методами ИК спектроскопии и ЭТА разработаны три варианта несущей изоляции плоскостенных криогенных камер К-1000 для хранения в жидком азоте крови и других применяемых в медицине биоматериалов: порошковая с уплотнением под вакуумом, порошковая со стеклопластиковыми дистанци-

онными проставками и ячеистая из жесткого открытопористого пенополиуретана (а.с. № 901706). Серийный выпуск камер организован на МЭЗГМ.

Результаты выполненных автором исследований оптических свойств волокнистых материалов стали основой для разработки новых более эффективных прокладочных материалов из синтетических, целлюлозных и базальтовых волокон (а.с. № 703614, № 903442). В дальнейшем эти работы были продолжены ФТИНТ АН УССР и УкрНПОбумпром и завершились созданием прокладочных материалов НТ-10 из базальтового волокна и СНТ-10 и УСНТ-10 из смеси лавсановых и целлюлозных волокон. Впервые выполнены измерения температурных зависимостей $\lambda_{эф}$ ряда композиций ВМИ с этими материалами (рис. 2) и разработана эффективная теплоизоляционная система для сельскохозяйственных сосудов Дьюара типа СДС, обеспечивающая повышенную длительность хранения в них жидкого азота. В частности, для сосудов емкостью 30 л длительность хранения азота увеличена со 140 суток (СДС-30-1) до 200-240 суток (СДС-30-2). Полученные результаты подтверждены испытаниями опытной партии сосудов на Коростенском заводе химического машиностроения. Серийный выпуск сосудов СДС-5-2, СДС-20-2, СДС-30-2 начнется в 1988 г. Ожидаемый годовой экономический эффект от использования указанных сосудов в сельском хозяйстве составляет 490,5 тыс.руб.

В заключении в виде кратких выводов сформулированы основные научно-технические результаты работы:

1. Разработаны методики, открывающие возможность непосредственного исследования радиационного и контактного теплообмена в криогенной теплоизоляции и позволяющие существенно сократить объем трудоемких и длительных калориметрических измерений.

2. Впервые выполнены подробные измерения в ИК диапазоне длин волн спектральных оптических свойств теплоизоляционных материалов и разработана методика расчета интегральных коэффициентов ослабления излучения для любых, в том числе криогенных, температур источников излучения.

3. Исследован радиационный теплообмен в ВМИ и ВВИ. Подтверждена правомерность аддитивного подхода к анализу общего теплопереноса в этих видах изоляции.

4. Исследован теоретически и экспериментально радиационно-

кондуктивный теплообмен в ВМИ, получена зависимость для ее эффективного коэффициента теплопроводности. Показаны существенное влияние прокладочных материалов на теплоперенос излучением в ВМИ и возможность подбора этих материалов посредством изучения их оптических свойств.

5. Впервые выполнено непосредственное экспериментальное исследование закономерностей контактного теплообмена в теплоизоляции. Получены эмпирические зависимости, позволяющие проводить качественную, а в ряде случаев (для ВПИ и ВВИ) и количественную оценку величины контактной теплопроводности изоляции.

6. Впервые получена эмпирическая зависимость, позволяющая определять интегральную полусферическую поглотительную способность металла с оптически гладкой поверхностью в диапазоне температур 4,2–293 К по величине его удельного электрического сопротивления при соответствующей температуре без проведения сложных и длительных калориметрических измерений. Исследовано влияние ряда технологических факторов на оптические свойства металлов при криогенных температурах.

7. Впервые измерены температурные зависимости ряда текстур ВМИ с экранами из алюминиевых фольг различной толщины и прокладками на основе стеклянных, базальтовых, синтетических и целлюлозных волокон. Проведены исследования прочностных и теплофизических свойств открытопористого жесткого пенополиуретана.

8. Использование результатов проведенных в настоящей работе исследований позволило разработать и внедрить на заводах отрасли при производстве криогенного емкостного оборудования новые более эффективные и технологичные теплоизоляционные материалы; обеспечить промышленный выпуск на МЭЗИМ гелиевого емкостного оборудования – сосудов СТГ, криостатов КГ, цистерн ЦПГ–0,5/0,7, которым присвоен Государственный Знак качества, и криогенных камер К–1000 для нужд медицины; разработать и обеспечить серийный выпуск на Коростенском заводе химического машиностроения типоразмерного ряда сосудов типа СДС с повышенной длительностью хранения жидкого азота для нужд сельского хозяйства.

9. Общий годовой экономический эффект от использования результатов работы составляет около 762 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих

работак:

1. Мильман С.Б., Каганер М.Г. Исследование переноса тепла излучением в вакуумно-порошковой изоляции методом инфракрасной спектроскопии// ИЖ.-1975.-Т.28, № 1.-С.40-45.

2. Мильман С.Б., Каганер М.Г., Селяков Н.Г. Исследование оптических характеристик и лучистого теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах методом ИК спектроскопии// Журнал прикладной спектроскопии.-1976.-Т.25, вып.2.-С.277-283.

3. Мильман С.Б., Каганер М.Г., Великанова М.Г., Александров Ю.Г., Баранова С.И. Использование вакуумной металлизации при создании эффективной тепловой изоляции в сосудах для жидкого гелия// Тезисы докладов II Межреспубликанской научно-технической конференции по вакуумной металлизации в народном хозяйстве.- Рига, 1977.- С.20.

4. Мильман С.Б., Каганер М.Г. Исследование влияния нагрузки на термическое и электрическое сопротивление материалов криогенной теплоизоляции// ИЖ.-1979.-Т.37, № 2.-С.345-349.

5. А.с. № 703614 СССР, МКИ² 2I H 5/18. Волокнистая масса для изготовления теплоизоляционного материала/ Т.А.Анникова, М.Г.Каганер, М.Г.Великанова, С.Б.Мильман, В.В.Магницкий (СССР). - № 2635309.- Оpubл.15.12.79. Бюл.№ 46// Открытия. Изобретения.-1979.-№ 46.-С.123.

6. Мильман С.Б., Каганер М.Г., Великанова М.Г. Метод измерения поглотительной способности металлических поверхностей при низких температурах// Тезисы докладов XXI Всесоюзного совещания по физике низких температур. - Харьков, 1980.-Ч.4.-С.258-259.

7. А.с. № 901706 СССР, МКИ³ 17 C 3/04. Криогенная камера/М.Г.Каганер, М.Г.Великанова, С.Б.Мильман, В.А.Игнатъев (СССР).- № 2916766.- Оpubл.30.01.82. Бюл.№ 4// Открытия. Изобретения.-1982.-№ 4.-С.143.

8. А.с. № 903442 СССР, МКИ³ 2I H 5/18. Волокнистая масса для изготовления теплоизоляционного материала/ Т.А.Анникова, Э.Л.Аким, В.Н.Грицуляк, М.Г.Каганер, Л.Е.Комаровский, С.Б.Мильман, Е.В.Оносовский, А.П.Потапенко, Ю.Н.Приходько, В.Н.Столярков (СССР).- № 2928828.-Оpubл.07.02.82.Бюл.№5//Открытия.Изобретения.-1982.-№ 5.-С.137.

9. Мильман С.Б., Каганер М.Г. Исследование сложного радиационно-кондуктивного теплообмена в криогенной вакуумно-многослойной теплоизоляции// ИЖ.-1984.-Т.46, № 5.-С.754-760.

Ю. Мильман С.Б., Каганер М.Г. Исследование интегральных полусферических поглощательных способностей металлов при температурах 4,2-293 К// ИЖ.-1986.-Т.51, № 4.-С.638-645.

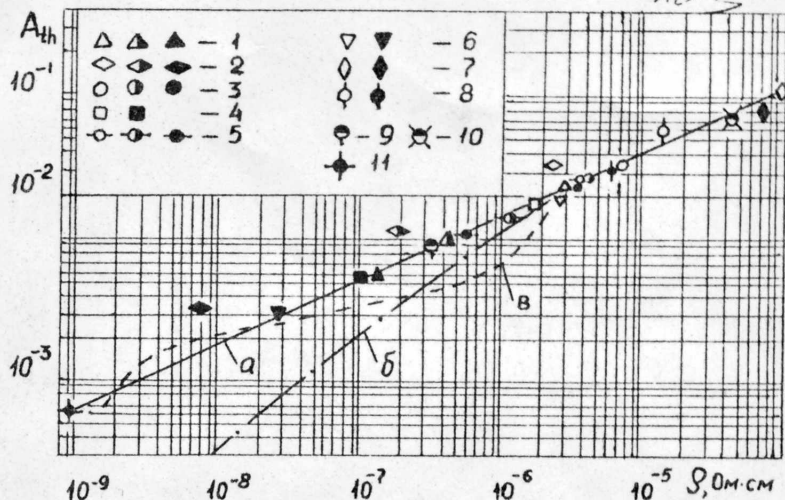


Рис. 1. Зависимость интегральной полусферической поглощательной способности A_{th} металлов от удельного электрического сопротивления ρ в интервале температур 4,2-293 К: светлые значки - 293 К, зачерненные сверху - 90 К, справа - 77 К, полностью - 4,2 К; 1 - фольга А5; 2 - фольга А99; 3 - ПЭТ-ДА; 4 - фольга М1; 5 - ПЭТ-ОМ; 6 - фольга Ср999,9; 7 - фольга I2X18NiOT; 8 - фольга Nb; 9 (медь), 10 (манганин), 11 (медь МО, напыленная на сталь в среде чистого гелия) - литературные данные; поверхностная шероховатость Ra , мкм: 0,08-0,05 (1, 8); 1,25-0,8 (2); 0,04-0,02 (3, 5); 0,16-0,1 (4); 0,32-0,16 (6); 0,1-0,08 (7); толщина покрытия δ , мкм: 0,05-0,04 (3); 0,2 (5); кривые а, б, в - расчет по формуле (10), классической теории, теории АСЗ

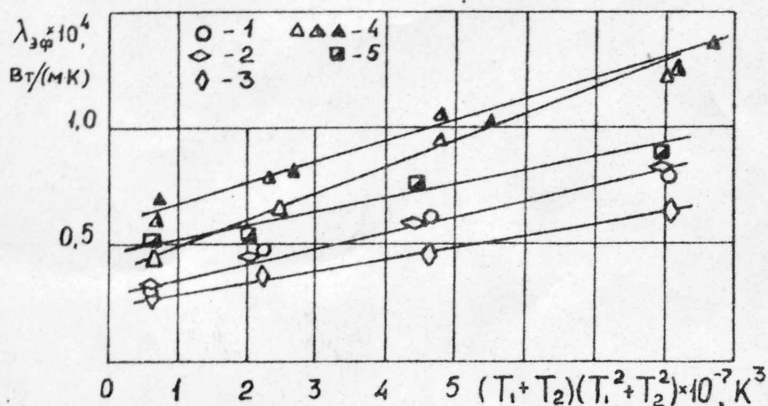


Рис. 2. Температурная зависимость $\lambda_{эф}$ ВМН при 77-293 К:
 1 - СНТ-10 + АДІ, 7 мкм; 2 - УСНТ-10 + АДІ, 7 мкм;
 3 - бумага (50 % вискозы + 50 % целлюлозы) + АДІ, 7 мкм;
 4 - ЭВТИ-7 + АДІ, 7 мкм; 5 - ЭВТИ-7 + АДІ, 10 мкм;
 6 - ЭВТИ-7 + ПЭТ-ДА, 12 мкм; 7 - НТ-10 + АДІ, 10 мкм

Л-46219 от 6.05.83г.

Заказ №563. Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана

