М295358

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

МИРОЛЮБСКАЯ Юлия Алексеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО И НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ИЗОЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

(Специальность 05.04.03 – Гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 1976

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте гелиевой техники.

Научный руководитель –
доктор технических наук Каганер М.Г.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, ~~профессор~~ ст. науч. сотр. Данилов И.Б.,
кандидат технических наук, ассистент Пылаев А.М.

Ведущее предприятие – указано в решении Учёного Совета.

Автореферат разослан "30" мая 1976 г.
Защита диссертации состоится "18" октября 1976 г.
на заседании Совета факультета "Энергомашиностроение"
Московского ...ного Знамени
высшего те...
107005, Мос...
"Энергома...
Ваши о...
высылать ...

С дисс... ища.

Учёны...
кандидат... озлов

Л 101314
Заказ 15...

М295358

Введение.

Актуальность проблемы. В связи с проникновением криогенной техники в различные отрасли народного хозяйства непрерывно возрастает потребность в резервуарах с малыми потерями криогенных жидкостей от испарения. Разработка средств хранения и транспортирования криогенных жидкостей привела к необходимости серьёзного усовершенствования их теплоизоляции, и, в первую очередь, наиболее эффективной из известных на сегодня типов низкотемпературной изоляции - вакуумно-многослойной. Актуальной стала задача исследования причин больших величин теплопроводности вакуумно-многослойной изоляции (ВМИ) промышленных резервуаров по сравнению с теплопроводностью лабораторных образцов её и изучения переноса тепла через эту изоляцию. Большая длительность нестационарных процессов охлаждения и естественного отогрева резервуаров с вакуумными типами изоляции потребовала серьёзного их изучения и разработки надёжной методики их расчёта.

№ 1295358

Цель исследования. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование стационарного и нестационарного процессов теплообмена в изоляции резервуаров криогенных жидкостей; изучение процессов охлаждения и естественного отогрева и влияния на интенсивность теплообмена изменения давления газов при этих процессах; изучение процесса переноса тепла в изоляции резервуаров и определение оптимальных параметров нанесения ВМИ на промышленные резервуары.

Методы исследования. При экспериментальном исследовании стационарного теплообмена в ВМИ использованы лабораторные резервуары криогенных жидкостей, в которых имитируются условия работы промышленных резервуаров. Методика исследования предусматривает возможность изучения влияния давления остаточных газов, плотности и композиции изоляции и других факторов на её теплопроводность. При анализе результатов испытаний резервуаров в режиме охлаждения использован метод регулярного режима. Обработка экспериментальных данных проведена на ЭВМ "Мир-1" методом наименьших квадратов. В теоретическом решении задачи отогрева использован метод сосредоточенных параметров, применение которого дало возможность учесть влияние давления газов, заполняющих изоляционное пространство, и температурную зависимость теплоёмкости металла стенки внутреннего сосуда на интенсивность теплообмена. Решение задачи получено численным методом с применением квадратурных формул Гаусса. Расчёты произведены с применением

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1295358
Миролюбская Ю.А. Исследов

ЭВИ "Мир-1".

Научная новизна. Установлено, что в вакуумных типах изоляции при охлаждении резервуаров после снижения давления до определённых величин наступает регулярный режим, вследствие чего возможно определение теплопроводности изоляции по темпу охлаждения резервуаров. Показано, что в процессе естественного отогрева давление газов в изоляционном пространстве резервуаров связано экспоненциальной зависимостью с температурой внутреннего сосуда. Получено аналитическое решение задачи отогрева криогенных резервуаров с вакуумными типами изоляции с учётом влияния давления остаточных газов, изменения теплоёмкости внутреннего сосуда и теплопритока по тепловым мостам. Изучен перенос тепла в ВМИ, смонтированной на резервуарах.

Практическая ценность. Предложен метод ускоренных испытаний криогенных промышленных резервуаров ёмкостью до 10 $м^3$ в режиме охлаждения при малом уровне жидкости. Разработана методика расчёта скорости естественного отогрева промышленных резервуаров с вакуумными типами изоляции. Получены экспериментальные данные, определены оптимальные параметры и разработана технология нанесения различных композиций ВМИ на резервуары разной формы и объёма. Это способствовало созданию ряда сосудов и криостатов с малыми потерями криогенных жидкостей от испарения. Разработана технология машинного нанесения высокоэффективной ВМИ с применением агрегата, позволившая организовать монтаж изоляции промышленных резервуаров в условиях серийного их производства; время нанесения изоляции сокращено в 15 раз по сравнению с изолированием вручную.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на I Всесоюзной конференции по криогенной технике. По теме диссертации опубликовано 7 статей и получено авторское свидетельство, внедрённое на заводах-изготовителях криогенных резервуаров. Метод ускоренных испытаний резервуаров в режиме охлаждения с малым уровнем жидкости внедрён на заводе-изготовителе, что позволило в 6-8 раз сократить длительность испытаний резервуаров на испаряемость. Методика расчёта скорости естественного отогрева промышленных резервуаров с вакуумными типами изоляции используется при их проектировании. Разработанная технология монтажа различных композиций изоляции использована в промышленном производстве сосудов для хранения жидкого азота и жидкого гелия с малыми потерями от испарения. Некоторые из сосу-

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

дов превосходят аналогичные зарубежные образцы.

Объём работы. Диссертационная работа с 14 таблицами, 60 рисунками и списком литературы изложена на 133 страницах и состоит из введения, пяти глав и выводов. Список литературы содержит 121 наименование работ, приложение представлено на 16 страницах.

Состояние вопроса и постановка задач исследования. Освоение производства резервуаров криогенных жидкостей вызвало необходимость исследования теплообмена в их изоляции в различных режимах её работы - в стационарном, а также в нестационарных режимах охлаждения и естественного отогрева. Изучение работ, посвящённых хранению криогенных жидкостей, показало, что вопросы теплообмена в изоляции резервуаров остались практически неисследованными. Опубликованные работы, посвящённые ВМИ, в подавляющем большинстве относятся к испытанию различных композиций плоских лабораторных образцов её. При этом у исследователей, как у отечественных, так и у зарубежных, отсутствует единая точка зрения на механизм переноса тепла через ВМИ, что не даёт возможности определить долю каждого вида теплообмена - излучения, теплопроводности твёрдого тела и остаточных газов - в общем теплопритоке. На начальном этапе работ коэффициент теплопроводности (КТ) ВМИ, смонтированной на криогенных резервуарах, превышал в 10 и более раз КТ плоских образцов ВМИ, достигая иногда значения 9 мквт/см.град. В этом случае применение ВМИ в промышленных резервуарах становилось проблематичным, поскольку такую величину КТ имеет более дешёвая вакуумно-порошковая изоляция (ВПИ). Необходимо было выяснить причины больших значений КТ ВМИ, смонтированной на промышленных резервуарах, изучить механизм переноса тепла через неё и наметить пути приближения значений КТ ВМИ резервуаров к величинам КТ плоских образцов её.

Проблема нестационарного переноса тепла теплопроводностью при охлаждении и естественном отогреве изучена для тел с постоянными или зависящими от температуры теплофизическими свойствами. Особенностью теплообмена при охлаждении и отогреве промышленных резервуаров является резкое изменение давления остаточных газов, сильно влияющего на теплопроводность вакуумных видов изоляции. Законы изменения давления газов в изоляционном пространстве резервуаров при охлаждении и отогреве промышленных резервуаров изучены не были. Теоретические и эксперимен-

тальные данные по отогреву и охлаждению криогенных промышленных резервуаров в литературе отсутствуют.

Основные задачи работы заключались в следующем.

1.Исследование теплообмена при охлаждении вакуумных типов изоляции резервуаров с учётом изменения давления остаточных газов.

2.Получение обобщённых зависимостей изменения давления остаточных газов в межстенном пространстве криогенных промышленных резервуаров при их естественном отогреве.

3.Получение аналитического решения и разработка методики расчёта скорости естественного отогрева резервуаров с учётом изменения давления остаточных газов.

4.Изучение переноса тепла в ВМИ,смонтированной на резервуарах, и определение путей приближения величин её КТ к значениям КТ плоских образцов ВМИ.

5.Изыскание эффективного способа монтажа ВМИ на промышленных резервуарах для криогенных жидкостей и определение оптимальных его параметров.

Методика проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Экспериментальный лабораторный стенд даёт возможность определять количество жидкого азота,испарившегося из резервуара, измерять давление остаточных газов в изоляционном пространстве резервуаров и температуры внутреннего сосуда и слоёв изоляции во всех режимах работы изоляции-в стационарном, и в нестационарных режимах охлаждения и естественного отогрева.Эксперименты по исследованию стационарного теплообмена в изоляции проводили методом стационарного теплового режима,основанном на измерении количества испарившейся жидкости.В нестационарных режимах охлаждения и естественного отогрева измеряли все вышеуказанные параметры в зависимости от времени.

Величину коэффициента теплопроводности ВМИ в стационарном режиме вычисляли по закону Фурье.Обработку опытных данных в режиме охлаждения проводили на основе теории регулярного режима.Разработку методики расчёта скорости естественного отогрева проводили с учётом зависимости переноса тепла в ВМИ и ВПИ резервуаров от давления остаточных газов и температуры внутреннего сосуда.Общий приток тепла условно рассматривали как сумму переноса тепла излучением,теплопроводностью твёрдого тела и остаточных газов.

Анализ ошибок и определение погрешностей эксперимента проведены в соответствии с теорией математической статистики. Погрешность определения величин КТ ВМИ в стационарном режиме с вероятностью 0,68 составляет 11,5 %, погрешность определения величин КТ ВМИ и ВПИ в нестационарном режиме охлаждения составляет 24 % с той же вероятностью.

Исследование стационарного теплообмена в вакуумно-многослойной изоляции криогенных резервуаров.

Перенос тепла через изоляцию резервуаров имеет сложный характер и зависит от большого количества трудноучитываемых факторов. Поэтому оптимальным путём изучения теплообмена в изоляции резервуаров является экспериментальное его исследование. Эксперименты проводили на лабораторных резервуарах сферической и цилиндрической формы. Внутренний сосуд резервуаров подвешен в кожухе на тонкостенной горловине из нержавеющей стали, теплоприток по которой не превышает 15 % от общего притока тепла к криогенной жидкости. Это даёт возможность надёжно посчитать КТ изоляции. В качестве основной была выбрана композиция ВМИ из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм и стеклобумаги СБР-М-0,05, высокая анизотропность которой обеспечивает наибольшую чувствительность к краевым условиям и технологическим факторам. С изоляцией этой композиции были испытаны все способы монтажа изоляции.

Анализ теплообмена в изоляции, смонтированной на резервуарах, показал, что основной причиной повышенных значений КТ её являются побочные теплопритоки, обусловленные краевыми эффектами на стыках отдельных пакетов изоляции. Поэтому было решено проводить исследования с использованием способов, сводящих краевые эффекты к минимуму и обеспечивающих изотермичность слоёв изоляции по всей поверхности сосуда.

На цилиндрическом сосуде ёмкостью 15 литров ВМИ основной композиции была смонтирована способами спиральной намотки с различными методами изолирования днищ и способами продольно-поперечного бинтования сосуда полосами изоляции. Величины КТ ВМИ при нанесении её способами, основанными на спиральной намотке, имеют малые значения, близкие к 1 мквт/см.град. Эта величина только в два раза больше КТ плоских образцов ВМИ и в 5-7 раз меньше ранее полученных на резервуарах значений КТ ВМИ. Были испытаны также и некоторые другие компзиции изоляции, смонтированные способами спиральной намотки: алюминированная лавсановая плёнка, фольгированная стеклобумага, алюми-

ниевая фольга с целлюлозной бумагой, оцинкованная конденсаторная бумага. Величины КТ ВМИ составили значения от 0,75 мквт/ /см.град для изоляции из алюминированной плёнки до 1,85 мквт/см.град для изоляции из фольгированной стеклобумаги. При монтаже изоляции основной композиции на цилиндрическом сосуде ёмкостью 15 литров способами продольно-поперечного бинтования величина КТ ВМИ составила 0,8 - 0,9 мквт/см.град.

Был разработан новый способ спиральной намотки изоляции цилиндрических сосудов, обеспечивающий наряду с низким КТ высокую технологичность нанесения ВМИ. Способ защищён авторским свидетельством и внедрён на заводах - изготовителях резервуаров.

Монтаж изоляции на шаровом сосуде ёмкостью 15 литров осуществляли способами бинтования и способами нанесения изоляции в форме "апельсиновых долек". Значения КТ ВМИ составили 1,8 мквт/см.град в обоих случаях, что почти вдвое больше КТ ВМИ цилиндрического сосуда и в 4 раза больше значений КТ плоских образцов ВМИ.

Анализ механизма переноса тепла в ВМИ резервуаров показал, что одной из возможных причин повышенных значений КТ ВМИ по сравнению с плоскими её образцами могла быть большая доля переноса тепла теплопроводностью газами. Вследствие худших условий вакуумирования замкнутых слоёв изоляции резервуаров возможно повышенное давление остаточных газов внутри слоёв изоляции резервуаров по сравнению с лабораторными образцами изоляции, имеющими открытые торцы. Зависимость КТ ВМИ от давления остаточных газов была определена экспериментально для некоторых композиций ВМИ, смонтированных способами спиральной намотки на цилиндрическом сосуде ёмкостью 15 литров и способом бинтования на шаровом сосуде ёмкостью 15 литров. Зависимость КТ ВМИ от давления удовлетворяет полученной в работе М.Г.Каганера зависимости КТ плоских образцов ВМИ от давления газов

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda(p) = \lambda_0 + \frac{175}{1 + 0{,}02\,\frac{n}{p}}, \qquad (1)$$

где n - плотность изоляции, экр/см,

λ_0 - коэффициент теплопроводности изоляции при давлении менее $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

Хорошее согласование полученных нами экспериментальных

данных с расчётами по формуле (I) даёт возможность сделать вывод, что при давлениях в изоляционной полости ниже 1.10^{-4} мм рт.ст. перенос тепла газами в ВМИ пренебрежимо мал.

При исключении переноса тепла газами в ВМИ резервуаров остаются два вида переноса тепла - излучением λ_{u} и по твёрдому телу $\lambda_{тт}$. Вследствие влияния большого числа трудноконтролируемых параметров на каждый из указанных видов переноса тепла произвести точный их расчёт не представляется возможным. Некоторые исследователи /Мак-Грегор, Ретти, Карен и Каннингтон/ получили разного вида эмпирические формулы для подсчёта переноса тепла в образцах ВМИ излучением и теплопроводностью твёрдого тела. Из-за различия теплопереноса в образцах ВМИ и в ВМИ, смонтированной на резервуарах, формулы не пригодны для оценки переноса тепла.

Используя полученные Великановой М.Г. зависимости КТ плоского образца ВМИ от температуры тёплой стенки, можно приблизительно оценить перенос тепла излучением в этой изоляции.

Известно, что в случае переноса тепла только теплопроводностью между граничными поверхностями с температурами $T_т$ и $T_х$ при постоянном КТ материала распределение температуры по толщине слоя изоляции прямолинейное. В случае переноса тепла только излучением при постоянной степени черноты экранов распределение температуры криволинейное. При совместном переносе тепла излучением и теплопроводностью кривая распределения температуры по толщине слоя изоляции располагается между двумя указанными линиями. Сопоставление расчётной величины переноса тепла излучением с кривой распределения температуры по толщине слоя изоляции даёт возможность выделить преобладающий вид переноса тепла, наметить пути дальнейшего его снижения и определить оптимальные параметры нанесения ВМИ с минимальным коэффициентом её теплопроводности.

В диссертации представлены рекомендации по выбору эффективного способа монтажа ВМИ, композиции изоляции и оптимальных параметров её нанесения на резервуары разной формы для получения малых значений коэффициентов теплопроводности смонтированной изоляции.

Исследование теплообмена при охлаждении резервуаров с вакуумными типами изоляции.

При заливке криогенной жидкости во внутренний сосуд резервуара давление остаточных газов резко падает. Величина давле-

ния газов в изоляционном пространстве резервуаров зависит от ряда параметров, в том числе – количества адсорбента, его адсорбционных свойств, газовыделения изоляционных материалов, объёма изоляционного пространства. Поэтому зависимость давления газов от времени для каждого резервуара может быть определена только опытным путём. Эксперименты по исследованию теплообмена при охлаждении проводили на опытных и промышленных резервуарах ёмкостью от 15 литров до 100 $м^3$ шаровой и цилиндрической формы с ВМИ или ВПИ. Было установлено, что закономерности изменения давления в ВПИ и в ВМИ резервуаров имеют различный характер. Для композиций ВМИ зависимость давления газов P над изоляцией от времени τ при охлаждении имеет вид

$$P = \exp(a - b\tau) + P_{ст} \qquad (2)$$

где a и b – постоянные,

$P_{ст}$ – давление газов в стационарном режиме.

Давление газов в ВМИ снижается достаточно быстро и по прошествии 3–4 часов от заливки становится менее $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст., то есть таким, при котором КТ ВМИ перестаёт зависеть от давления.

Известно, что зависимость величины теплового потока от времени для задачи охлаждения тела с постоянными теплофизическими свойствами описывается уравнением

$$\frac{q}{q_{ст}} = 1 + 2\Phi \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2\pi^2 Fo) \qquad (3)$$

где q – величина удельного теплового потока,

$q_{ст}$ – величина удельного теплового потока в стационарном режиме,

Φ – фактор формы резервуара,

Fo – число Фурье,

n – целое положительное число.

При значениях числа Фурье более 0,1, что обычно соответствует 4 часам для ВМИ толщиной 2 см, второй член в уравнении (3) не превышает 5 % от первого. В этом случае в ВМИ наступает регулярный режим и зависимость теплового потока через ВМИ принимает вид

$$\frac{q}{q_{ст}} = 1 + 2\Phi \exp(-\pi^2 Fo) \qquad (4)$$

При определении числа Фурье значения теплоёмкости изоляции следует вычислять по закону аддитивности по теплоёмкости их

компонентов при среднеинтегральной температуре ВМИ, рассчитанной по толщине слоя ВМИ и равной 200 К – 230 К. Зависимость теплового потока от времени укладывается на прямую линию в координатах $\lg\left(\frac{q}{q_{ст}}-1\right)-\tau$, по наклону которой можно вычислить величину коэффициента температуропроводности, а, следовательно, и теплопроводности изоляции. Значения величин КТ ВМИ, вычисленные из стационарного и нестационарного режимов, расходятся не более, чем на 20 %.

При охлаждении резервуаров с ВПИ зависимость давления газов Р от времени τ может быть описана уравнением

$$P = a/\tau + P_{ст} \qquad (5)$$

Для резервуаров с ВПИ зависимость теплового потока от времени в указанных координатах иногда отклоняется от прямой линии. Анализ показал, что это может быть обусловлено двумя причинами: во-первых, относительно малыми значениями числа Фурье, вследствие чего второй член уравнения (3) становится соизмерим с первым и режим перестаёт быть регулярным, и, во-вторых, медленным снижением давления в изоляции. В случае быстрого снижения давления и больших значений числа Фурье в ВПИ также наступает регулярный режим.

Исследование теплообмена при естественном отогреве резервуаров с вакуумными типами изоляции.

В процессе естественного отогрева давление в изоляционном пространстве резервуаров, а, следовательно, и КТ вакуумных типов изоляции возрастает с увеличением температуры внутреннего сосуда, на поверхности которого расположен адсорбент. Экспериментальные исследования проводили при отогреве шарового сосуда ёмкостью 15 литров с ВПИ, цилиндрического сосуда ёмкостью 15 литров с ВМИ и цилиндрического резервуара ёмкостью 300 литров с ВМИ. В ходе экспериментов было установлено, что давление заполняющих изоляционное пространство газов Р при отогреве резервуаров от 77 К до 273 К связано с температурой внутреннего сосуда Т экспоненциальной зависимостью, которая имеет вид

для ВМИ $$P = \exp\left(1{,}1 - \frac{960}{T}\right) \qquad (6)$$

для ВПИ $$P = \exp\left(1{,}84 - \frac{1080}{T}\right) \qquad (7)$$

Некоторый разброс экспериментальных точек и их отклонение от прямой в координатах $\lg P - \frac{1}{T}$ имеет место в области

давлений ниже $1 \cdot 10^{-}$ мм рт.ст.В этой области КТ ВМИ и, тем более, ВПИ , мало изменяется с изменением давления.При обработке опытных данных по отогреву криогенных резервуаров для простоты расчётов принимали зависимости давления газов,выраженные указанными формулами.

Теоретическое решение задачи отогрева получено методом сосредоточенных параметров.Для участка поверхности резервуара было составлено уравнение теплового баланса, в котором тепло dq ,проходящее через изоляцию с температурами на границах $T_т$ и $T_х$,расходуется на увеличение внутренней энергии внутреннего сосуда dq_1 и слоя изоляции dq_2.

$$-dq = dq_1 + dq_2 \qquad (8)$$

или $$\frac{\lambda (T_т - T_х)}{\ell} d\tau = c_м \rho_м \delta dT + c_{из} \rho_{из} \ell \, dT_{из} \qquad (9)$$

где λ - КТ изоляции,

$c_м, \rho_м, \delta$ - теплоёмкость,плотность и толщина стенки внутреннего сосуда,

$c_{из}, \rho_{из}, \ell$ - теплоёмкость,плотность и толщина слоя изоляции.

В случае прямолинейного распределения температуры по толщине слоя изоляции при отогреве внутреннего сосуда на температуру dT изоляция отогреется на $\frac{dT}{2} = KdT$.При криволинейном распределении температуры коэффициент К изменчется от 0 до I.

После интегрирования уравнения (9) от начальной температуры отогрева $T_1 = T_х$ до конечной температуры отогрева $T_2 < T_т$, получаем при условии постоянства $c_м, c_{из}, \lambda$

$$F_0 = (A + K) \cdot \ln \frac{T_2 - T_т}{T_х - T_т} \qquad (10)$$

где $$A = \frac{c_м \cdot \rho_м \cdot \delta}{c_{из} \cdot \rho_{из} \cdot \ell} \qquad (11)$$

Для различных типов ВМИ значение А составляет величину 5-7, то есть, количество тепла,аккумулируемое единицей поверхности внутреннего сосуда в 5-7 раз больше количества тепла,аккумулируемого единицей поверхности изоляции.Для простоты расчётов пренебрегаем теплом,израсходованным на отогрев ВМИ.В этом случае распределение температуры по слою изоляции принимаем прямолинейным и коэффициент К равным 0.

Для различных типов ВПИ значение А составляет от 0,5 до 3,0. Поскольку перенос тепла в ВПИ осуществляется, в основном, излучением, принимаем для ВПИ распределение температуры по кривой излучения. В этом случае средняя температура изоляции в начальный период отогрева составляет 234 К, и коэффициент К равен 0,273. Для расчёта скорости отогрева резервуаров с ВПИ при постоянных $C_м$, $C_{из}$, λ следует воспользоваться формулой (10) при К=0,273.

Полученное нами решение с удовлетворительной для инженерных расчётов точностью согласуется с точным решением уравнения теплопроводности, которое получили Крейт, Дин и Брукс при постоянных теплофизических свойствах материалов изоляции и стенки внутреннего сосуда. Это говорит о том, что принятые нами упрощающие допущения не искажают физической сущности процесса теплообмена и составленное нами уравнение правильно описывает механизм переноса тепла. Полученное решение даёт возможность учесть изменение теплофизических свойств изоляции и металла в процессе отогрева резервуаров в отличие от решения, полученного указанными выше авторами.

Кажущийся КТ ВМИ λ рассматриваем, как сумму проводимостей по твёрдому телу $\lambda_{тт}$, излучением $\lambda_и$ и теплопроводностью остаточных газов $\lambda(P)$. Проводимость по твёрдому телу принимаем постоянной во всём диапазоне отогрева. Проводимость тепла излучением принимаем как

$$\lambda_и = \varepsilon \sigma F (T_т + T_х)(T_т^2 + T_х^2) \qquad (12)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана,
F – площадь поверхности изоляции,
ε =0,06 – степень черноты алюминиевой фольги.

Проводимость остаточных газов учитываем вторым членом уравнения (1) зависимости КТ ВМИ от давления. Зависимость давления газов от температуры внутреннего сосуда с ВМИ выражена нами формулой (6). Подставив уравнение (6) в уравнение (1), получим зависимость проводимости остаточных газов от температуры внутреннего сосуда

$$\lambda(P) = \frac{175}{1+0{,}02\, n \exp\left(\frac{960}{T} - 1{,}1\right)} \qquad (13)$$

Влияние теплопритока через тепловые мосты на скорость отогрева учитываем следующей составляющей КТ ВМИ

$$\lambda_{тм} = Q_{тм} \cdot \ell / F_{из} (T_т - T_х) \qquad (14)$$

где $Q_{тм}$ – теплоприток через тепловые мосты,

$F_{из}$ – площадь поверхности изоляции.

Величину КТ ВМИ рассматриваем как сумму всех указанных проводимостей:

$$\lambda = \lambda_{тт} + \lambda_{и} + \lambda(P) + \lambda_{тм} \qquad (15)$$

Подставив уравнения (12),(13),(14) и (15) в уравнение (8), получим

$$d\tau = \frac{\rho_м \delta c (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) dT}{\lambda_{тт} + \varepsilon\sigma F (T_т + T)(T_т^2 + T^2) + \frac{175}{1 + 0.02\, n \cdot \exp\left(\frac{960}{T} - 1{,}1\right)} + \frac{Q_{тм}\ell}{F(T_т - T)}} \qquad (16)$$

где C_0, C_1, C_2 – коэффициенты.

Решение уравнения (16) получено методом численного интегрирования с применением квадратурных формул Гаусса. Расчёты произведены с помощью ЭВМ "Мир-1". Аналогичные зависимости получены для расчёта скорости отогрева резервуаров с ВПИ. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими расчётами. Для инженерных расчётов разработана методика приближённого расчёта времени отогрева криогенных резервуаров и построены кривые, облегчающие расчёт отогрева.

Промышленное внедрение результатов работы.

Некоторые композиции ВМИ были смонтированы различными способами спиральной намотки на резервуарах ёмкостью 300 литров и 100 м^3. Значения КТ составили 1,0 и 2,9 мквт/см.град соответственно. Для изолирования сосудов ёмкостью до 100 литров в условиях их серийного производства был спроектирован и изготовлен агрегат машинной намотки изоляции. В задачу автора настоящей работы входило определение оптимальных параметров и отработка технологии нанесения ВМИ с применением агрегата на сосуды, предназначенные для хранения биопродуктов в жидком азоте и для хранения жидкого гелия. КТ ВМИ составил значение около 1 мквт/см.град.

Проведённые исследования показали, что между скоростью изменения теплового потока в режиме охлаждения и теплопритоком через изоляцию в стационарном режиме имеет место однозначная зависимость. На основании этого был разработан метод ускоренных испытаний резервуаров ёмкостью до 10 м^3 в нестационарном режиме охлаждения при малом уровне жидкости. Метод включён в технические условия на изготовление резервуаров и внедрён на заводе – изгото-

вителе. Время испытаний резервуаров на испаряемость по новому методу сокращено в 6-8 раз по сравнению с применявшемся ранее методом испытаний резервуаров на испаряемость до установления стационарного режима.

ВЫВОДЫ.

1. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование стационарного и нестационарного теплообмена в изоляции резервуаров криогенных жидкостей.

2. Установлено, что в изоляции резервуаров при охлаждении после снижения давления до определённой величины наступает регулярный режим, по темпу изменения теплового потока которого возможно определение реального коэффициента теплопроводности изоляции промышленных резервуаров.

3. Разработан метод ускоренных испытаний промышленных резервуаров, позволяющий по скорости их охлаждения при малом уровне криогенной жидкости определять потери от испарения при стационарном хранении полностью залитых резервуаров. Внедрение метода на заводе - изготовителе позволило в 6 - 8 раз сократить длительность испытаний резервуаров на испаряемость.

4. Установлено, что в процессе естественного отогрева давление газов в изоляционном пространстве промышленных резервуаров с вакуумными типами изоляции связано экспоненциальной зависимостью с температурой внутреннего сосуда.

5. Изучен перенос тепла в вакуумных типах изоляции резервуаров в процессе естественного отогрева. Получено теоретическое решение задачи естественного отогрева криогенных промышленных резервуаров и разработаны точная и приближённая методики расчёта скорости естественного отогрева промышленных резервуаров с вакуумными типами изоляции с учётом влияния изменения давления газов и теплопритока через тепловые мосты.

6. На созданных экспериментальных сосудах изучен перенос тепла через вакуумно-многослойную изоляцию резервуаров в стационарном режиме. Разработка технологии монтажа и определение оптимальных параметров нанесения ряда композиций вакуумно-многослойной изоляции позволили получить коэффициент теплопроводности смонтированной изоляции, равный I мквт/см.град. Защищенный авторским свидетельством способ монтажа вакуумно-многослойной изоляции внедрён в серийное производство резервуаров.

7. Разработка технологии машинного нанесения высокоэффективной вакуумно-многослойной изоляции резервуаров ёмкостью до I00 литров с применением агрегата сократила время нанесения изоляции

в 15 раз по сравнению с изолированием вручную.

8.Работа завершена созданием промышленных резервуаров и криостатов различной ёмкости с малыми потерями криогенных жидкостей от испарения.

Содержание диссертации раскрыто в следующих работах.

1.Мороз А.И.,Каганер М.Г.,Великанова М.Г.,Фетисова Л.И., Миролюбская Ю.А.Вакуумно-многослойная изоляция с прокладками из стеклобумаги."Кислородное и автогенное машиностроение", Цинтихимнефтемаш, 3, № 4,1965 г.,Москва.

2.Каганер М.Г.,Миролюбская Ю.А.Изыскание эффективного способа монтажа вакуумно-многослойной изоляции на изделиях. "Криогенное,кислородное и автогенное машиностроение",Цинтихимнефтемаш, № 2, 1968 г., Москва.

3.Каганер М.Г.,Миролюбская Ю.А.Способ нанесения вакуумно-многослойной изоляции.Авторское свидетельство № 298 790. Бюллетень "Открытия,изобретения,промышленные образцы и товарные знаки", № 1, 1971 г., Москва.

4.Каганер М.Г.,Миролюбская Ю.А.Исследование нестационарного теплообмена в сосудах с вакуумно-порошковой изоляцией. "Криогенное,кислородное и автогенное машиностроение",Цинтихимнефтемаш, № 3, 1971 г., Москва.

5.Миролюбская Ю.А.,Фарбер И.М.,Мирославская Ю.А.Изготовление и испытание опытных образцов сосудов Дьюара трёх типоразмеров для сельского хозяйства."Криогенное и кислородное машиностроение",Цинтихимнефтемаш, № 3, 1973 г.,Москва.

6.Великанова М.Г.,Каганер М.Г.,Мильман С.Б.,Миролюбская Ю.А.,Фетисов Ю.Н.,Юрчик Л.М.Усовершенствование теплоизоляции сосудов для жидкого азота и гелия,способов создания и поддержания в ней вакуума.Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по криогенной технике,Цинтихимнефтемаш,№ 4, 1973г.,Москва.

7.Миролюбская Ю.А.,Каганер М.Г.,Фарбер И.М.,Мирославская Ю.А.Машинное нанесение многослойно-вакуумной теплоизоляции в криогенных сосудах. "Кислородное и криогенное машиностроение",Цинтихимнефтемаш, № 4, 1974 г.,Москва.

8.Каганер М.Г.,Миролюбская Ю.А. Испытание различных способов монтажа вакуумно-многослойной изоляции на сосудах ёмкостью до 300 литров.Аппараты и машины кислородных и криогенных установок,выпуск 14,Машиностроение,1974 г.,Москва.