

И 86720

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

АЛЬ-АМИН ИБРАГИМ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ УДАЛЕНИИ ВЛАГИ
С ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ
КРИОПОЛОСТИ МЕТОДОМ ВАКУУМИРОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВАКУУМИРОВАНИЯ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
КРИОПОЛОСТЕЙ**

**05.04.03 — Машины и аппараты холодильной и криоген-
ной техники и систем кондиционирования**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 1992



1086720

Аль-Амин Ибрагим Исследов

Работа выполнена в Московском ордена
ного Знамени институте химического маши

Научный руководитель — доктор техниче
фессор **Б. А. ИВАНОВ**.

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор **В. М. БРОДЯНСКИЙ**, кандидат технических на-
ук, **В. И. КУПРИЯНОВ**.

Ведущая организация — НПО Гелиймаш.

Защита диссертации состоится « 19 » октября 1992 г.
в 14 час. на заседании специализированного совета в
Московском Государственном техническом университете
им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская
наб., д. 1.

Автореферат разос
отзыв в двух экзем
просьба присылать
ская ул., д. 5.

С диссертацией
им. Н. Э. Баумана

Ученый секре
специализированно
кандидат техничес
доцент

1086720

Актуальность темы

Использование холода в различных отраслях народного хозяйства приводит к быстрому развитию криогенной техники. Значительные энергетические и материальные затраты, связанные с получением холода, заставляют искать пути повышения эффективности криогенного оборудования. В частности, создание емкостей для транспортирования и хранения охлажденных газов, имеющих низкую величину потерь от испарения. Одним из необходимых условий уменьшения испаряемости жидкостей при хранении в резервуарах является получение и поддержание определенного низкого давления в изоляционной полости емкости, так как от этого зависит в значительной мере эффективность теплоизоляции.

Получение и сохранение вакуума в изоляционной полости в течение длительного времени представляет определенные трудности, обусловленные натеканием газов через микротечи в кожухе и внутреннем сосуде, а также газовыделением конструкционных материалов оборудования и загрязнений.

В промышленных установках, особенно монтируемых на открытых площадках, наблюдаются случаи нахождения в изоляционной полости криогенных емкостей и трубопроводов загрязнений в виде капельной (конденсированной) примеси, таких как влага, вакуумные масла, и другие вещества. Они появляются также на поверхности изоляции, например, при разгерметизации или переезде детельства или теплоизоляции. Наличие капельных примесей в изоляционной полости не позволяет достигнуть или сохранить рабочий уровень вакуума до их практически полного удаления.

К настоящему времени разработано достаточно много способов удаления примесей из теплоизоляционных полостей криогенного и холодильного оборудования. Однако эти способы индивидуальны и их эффективность существенно различна.

Продувка изоляционного пространства, особенно вакуумно-многослойной изоляцией (ВМИ), сухим газом не всегда эффективна из-за широко разветвленной структуры полости и большого числа застойных зон.

Прогрев изоляционных полостей как способ удаления из них примесей используется обычно только для сосудов малых размеров, т.к. прогреву подвергаются как стенки полости, так и изоляционный материал.



Из теплоизоляции крупных криогенных изделий капельные примеси удаляются преимущественно вакуумной откачкой их паров.

Таким образом, общие способы и методики удаления капельных примесей из непрогреваемых криогенных теплоизоляционных полостей в настоящее время разработаны недостаточно. Соответственно отсутствуют эффективные режимы вакуумирования непрогреваемых изоляционных полостей при нахождении в них капельных примесей. Отсутствие рекомендаций по рациональным способам удаления капельных примесей применительно к теплоизоляционным полостям криогенных резервуаров, цистерн и трубопроводов приводит на практике к повышенной длительности создания стабильного разрежения в таких полостях.

Вышеизложенное определяет актуальность настоящей работы, основанной на исследованиях которой связаны с планами МИХМа по теме "Исследование процессов, аппаратов и машин криогенных установок" и теме "Исследование, расчет и проектирование схем, машин и аппаратов криогенных установок", темпланом НПО "Криогенмаш".

Цель работы - исследование процессов тепло-массопереноса при откачке паров влаги, находящейся на поверхностях теплоизоляционных элементов криополости, и разработка методики вакуумирования загрязненных теплоизоляционных криополостей.

Методы исследования Методом физического моделирования осуществлено разбиение процесса удаления капельной примеси на несколько диапазонов, отличающихся фазовыми состояниями примеси.

Методом математического моделирования с использованием численного счета на ЭВМ по конечно-разностной схеме получены данные о влиянии основных внешних параметров на длительность удаления капельной примеси способом постоянного вакуумирования.

Экспериментальным методом подтверждена эффективность разработанных способов удаления и режимов вакуумирования, а также правильность математического моделирования.

Обработка экспериментальных данных и оценка точности математических моделей проведена методом статистического анализа.

Научная новизна работы определяется тем, что создан ряд расчетных моделей удаления загрязнений из теплоизоляционных криополостей для разных типов теплоизоляции и параметров вакуумирования, разработана методика определения значений локальных коэффициентов теплопередачи к удаляемым загрязнениям, разработана методика вакуумирования загрязненных теплоизоляционных криополостей.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработаны рекомендации по организации эффективной откачки криогенной теплоизоляционной полости при нахождении в ней капельной примеси;
- разработано несколько эффективных способов удаления капельной примеси из непрогрываемых криогенных теплоизоляционных полостей.

В диссертации защищаются:

- модели тепломассопереноса при удалении загрязнений из теплоизоляционных криополостей при вакуумировании межстенного пространства;
- результаты теоретического и экспериментального исследования длительности удаления загрязнений путем откачки их таров;
- методика определения значений локальных коэффициентов теплопритока к удаляемым загрязнениям;
- методика вакуумирования загрязненных теплоизоляционных криополостей.

Апробация работы. Материалы исследования по теме диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедр "Криогенная техника" МИХМ, научно-технических семинарах вакуумной лаборатории НПО "Криогенмаш", научно-техническом семинаре кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы две работы.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, изложенных на 90 страницах машинописного текста и иллюстрированных 50 рисунками и 32 таблицами, списка использованной литературы из 86 наименований, а также приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулировано направление работы.

В первой главе указывается, что попадание капельной примеси происходит не только при нарушении технологии изготовления, но и в силу ряда особенностей, имеющих место, например, при монтаже криогенной теплоизоляции. Капельная примесь, находящаяся в полости, ухудшает свойства изоляционного материала, не позволяет проводить эффективную откачку полостей, затрудняет обнаружение воз-

можных течей.

Анализ литературных данных, посвященных вопросу удаления капельных примесей путем вакуумирования, показал, что существует мнение о необходимости максимального увеличения скорости откачки изоляционного пространства для ускорения процесса удаления из полости капельных примесей и создания в ней стабильного рабочего разрежения.

Процесс удаления примеси из криогенной теплоизоляции характеризуется крайней нестационарностью протекания: изменяются давление, температура, а также теплофизические свойства контактирующих материалов и самой примеси.

Проблема удаления газящих загрязнений существует достаточно давно.

В настоящее время для непрогреваемых криогенных полостей, в которых находятся капельные примеси, режимы вакуумирования практически не отличаются от режимов откачки "сухих" полостей. Каждый режим, как правило, используется для какой-то конкретной ситуации и оборудования. Варьируются обычно способы интенсификации процесса (дополнительный прогрев полости, ее продувка газом), его параметры.

Интенсифицирование удаления газящих загрязнений прежде всего зависит от степени загрязненности, состава загрязнения, места расположения.

Рассмотренные в литературе рекомендации и приемы ведения вакуумирования загрязненных криополостей, позволяют улучшить процесс очистки поверхностей от газящих загрязнений и ускорить откачку.

Обзор литературных данных по методам расчета процесса парообразования показал, что на основе физического моделирования создано несколько моделей тепломассопереноса примеси, ориентированных на определенную стадию процесса. Для каждой модели тепломассопереноса оценено время удаления капельной примеси из изоляционной полости и время достижения рабочей глубины вакуума. Однако, эти расчеты трудно использовать в практических целях, т.к. и есть только качественное совпадение моделей и эксперимента.

Существенный недостаток предложенных режимов вакуумирования заключается в том, что они не позволяют оценить длительность ведения реального процесса удаления примеси из промышленных теплоизоляционных полостей из-за отсутствия достоверных сведений о

параметрах теплопереноса в них. Целью данной работы было исследование процессов переноса при откачке паров загрязнений с поверхностей криополостей и разработка методики вакуумирования загрязненных теплоизоляционных криополостей.

Во второй главе приводится теоретическое исследование процесса массопереноса удаляемой капельной примеси. Предложен общий подход для описания массовых потоков при удалении газящих примесей из влажных криополостей.

Рассмотрены основные варианты их соотношений и предложены физические подходы для описания массовых потоков при удалении газящих примесей из влажных криополостей.

Приведены результаты расчетов, значение которых заключается в обнаружении существования ряда аномальных явлений при вакуумировании влажных теплоизолированных полостей.

В разделе дано математическое описание процесса удаления газящей примеси путем вакуумирования полости и их величины на ЭВМ. Общая система уравнений имеет вид:

$$dm = \rho_{\text{пар}} S d\tau \quad , \quad (1)$$

$$dm = J_m F d\tau \quad , \quad (2)$$

$$S = - \frac{V}{n P} \frac{dP}{d\tau} + \frac{1}{P} \frac{dQ}{d\tau} \quad , \quad (3)$$

$$P = \rho_{\text{пар}} R T \quad , \quad (4)$$

$$q F d\tau - r dm + c m dT = 0 \quad , \quad (5)$$

$$q = K (T_{\text{ос.}} - T) \quad , \quad (6)$$

$$q F d\tau - L dm - r dm = 0 \quad , \quad (7)$$

где 1 и 2 - уравнения материального баланса; 3 - уравнение расширения газа при вакуумировании и при наличии источника газовыделения; 4 - уравнение состояния пара; 5 - уравнение теплового баланса при испарении или сублимации; 6 - уравнение теплоотдачи; 7 - уравнение теплового баланса при фазовом переходе;

$m, J_m, r, c, \rho, V, L, k, \rho_{\text{пар}}, \tau, Q, n, S, q$ - соответственно масса примеси, интенсивность гашения, теплота парообразования, теплоем-

кость, плотность вещества, объем полости, теплота фазового перехода, коэффициент теплопередачи, плотность пара, площадь контакта, длительность откачки, поток газовой выделенности, показатель политропы, скорость вакуумирования, мощность теплового потока.

Аналитическое решение данной системы уравнений невозможно, поскольку $T = f(m)$. Поэтому использовались численные методы решения на ЭВМ.

Результаты расчета показаны на рис. 1. Перегибы в зависимости $T = f(S)$ относятся к началу и окончанию фазового перехода жидкость - лед. Важно отметить, что при различных значениях c, r, L, S, k и F зависимости $\tau = f(S)$ представляют непрерывно убывающие функции, т.е. увеличение скорости откачки приводит к непрерывному снижению времени удаления примеси.

Расчеты показали (рис. 2), что при различных зависимостях K от T , когда K является уменьшающейся функцией при снижении температуры, а F уменьшается в процессе кристаллизации, может иметь место разрыв функции $T = f(S)$ и ее экстремум (минимум).

Таким образом, проведенный теоретический анализ показывает, что для разработки методики удаления примеси из теплоизоляционной полости путем вакуумирования и выдачи рекомендаций по режимам вакуумирования оказываются необходимыми прежде всего данные о реальных коэффициентах теплопередачи, т.е. определенным условием нахождения примеси в теплоизоляционной полости соответствует определенный режим вакуумирования с оптимальной скоростью, при котором время удаления примеси будет минимальным.

В третьей главе определены основные этапы экспериментального исследования, дается описание экспериментального стенда, изложена методика проведения экспериментов, приведены результаты экспериментального исследования процесса удаления капельной примеси путем вакуумирования при различных условиях, произведена оценка погрешностей измерений. Среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) не превышает 20% при определении давления в полости, 10% - температуры примеси, 15% - массы примеси, 20% - скорости откачки, 16,2% - длительности удаления (целевая функция).

Приведены результаты исследований теплопритока к удаляемому водному загрязнению, определены общий теплоприток q_{Σ} , удельный теплоприток и суммарный коэффициент теплопереноса α_{Σ} к загряз-

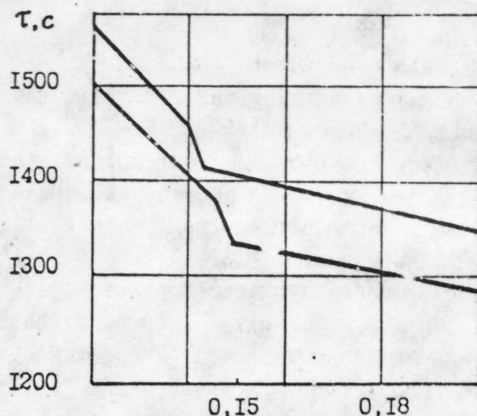


Рис. 1. Зависимость времени полного удаления капельной влаги от скорости откачки ее паров при постоянных: коэффициенте теплопередачи и площади контакта:
 $T_{0.c.} = 300\text{K}$, $m_0 = 1\text{ кг}$, $F_0 = 0,5\text{ м}^2$; $K = 110\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$,
 II; $K = 115\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

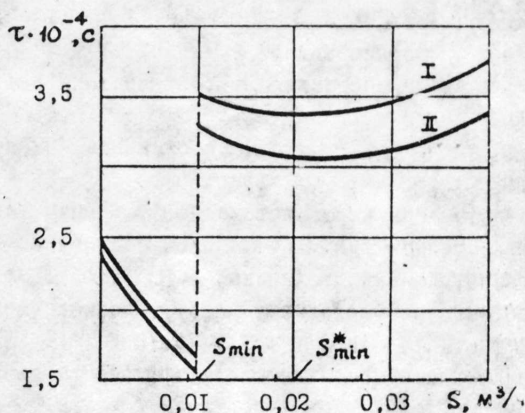


Рис. 2. Зависимость времени полного удаления капельной влаги от скорости откачки ее паров переменной площади контакта при переменном коэффициенте теплопередачи: $T_{0.c.} = 300$, $m_0 = 1\text{ кг}$, $F_0 = 0,5\text{ м}^2$,
 I; $K = 70,7 \cdot \exp(0,02 \cdot T - 9,6)$, II;
 $K = 252,88 \cdot \exp(0,024 \cdot T - 9,6)$

нению в зависимости от его температуры (рис. 3, 4).

Четвертая глава посвящена анализу результатов теоретических и экспериментальных исследований.

На рис. 5 представлены составляющие теплопритока для неэкранированной алюминиевой подложки. Из-за отсутствия экрана наблюдаются все три составляющих теплопритока (кондуктивной $q_{\text{конт}}$, конвективной $q_{\text{конв}}$, излучающей $q_{\text{изл}}$).

Характер зависимостей составляющих теплопритока от температуры не одинаков. Величины $q_{\text{конт}}$, $q_{\text{изл}}$ повторяют поведение величины q_{Σ} . В то время как величина $q_{\text{конв}}$ постоянно убывает с ростом температурного напора ΔT и уже при $\Delta T = 15 \div 18$ К близка к нулю. В начале процесса вакуумирования ($\Delta T \approx 0$) конвективная составляющая теплопритока больше двух других составляющих. Процесс кристаллизации загрязнения в значительной мере влияет на величины $q_{\text{конт}}$ и $q_{\text{конв}}$.

Графические зависимости $q_{\text{конв}}$ и $q_{\text{изл}}$ в области жидкой и твердой фазы примеси представляют возрастающие пропорциональные функции, при кристаллизации - вертикальные линии.

Графическая зависимость $q_{\text{конв}}$ до значения $\Delta T = 15$ К представлена обратно пропорциональной функцией.

На рис. 6 представлены составляющие теплопритока для экранированной алюминиевой подложки ($q_{\text{изл}} = 0$).

Характер поведения $q_{\text{конт}}$, $q_{\text{конв}}$ не одинаков. Их поведение повторяет поведение $q_{\text{конт}}$, $q_{\text{конв}}$ (рис. 5).

На рис. 7 представлены составляющие коэффициенты теплопередачи $\alpha_{\text{конт}}$, $\alpha_{\text{изл}}$ постоянны в каждом фазовом состоянии. При кристаллизации жидкого загрязнения величины $\alpha_{\text{конт}}$, $\alpha_{\text{изл}}$ резко уменьшаются. Аналогичное происходит у $\alpha_{\text{конв}}$, резкое уменьшение происходит не при $T = T_{\text{кр}}$, а при $\Delta T = 15 \div 18$ К.

На рис. 8 представлены составляющие коэффициенты теплопередачи для экранированной алюминиевой подложки ($\alpha_{\text{изл}} = 0$).

Характер поведения $\alpha_{\text{конт}}$, $\alpha_{\text{конв}}$ не одинаков. Их поведение повторяет поведение $\alpha_{\text{конт}}$, $\alpha_{\text{конв}}$ (рис. 7).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что теплотехнические свойства контактирующего материала влияют на значение оптимальной скорости вакуумирования.

Установлено, что оптимальная скорость откачки связана с существованием двух факторов: резким изменением площади контакта удаляемой влаги с материалом стенки во время кристаллизации и сниже-

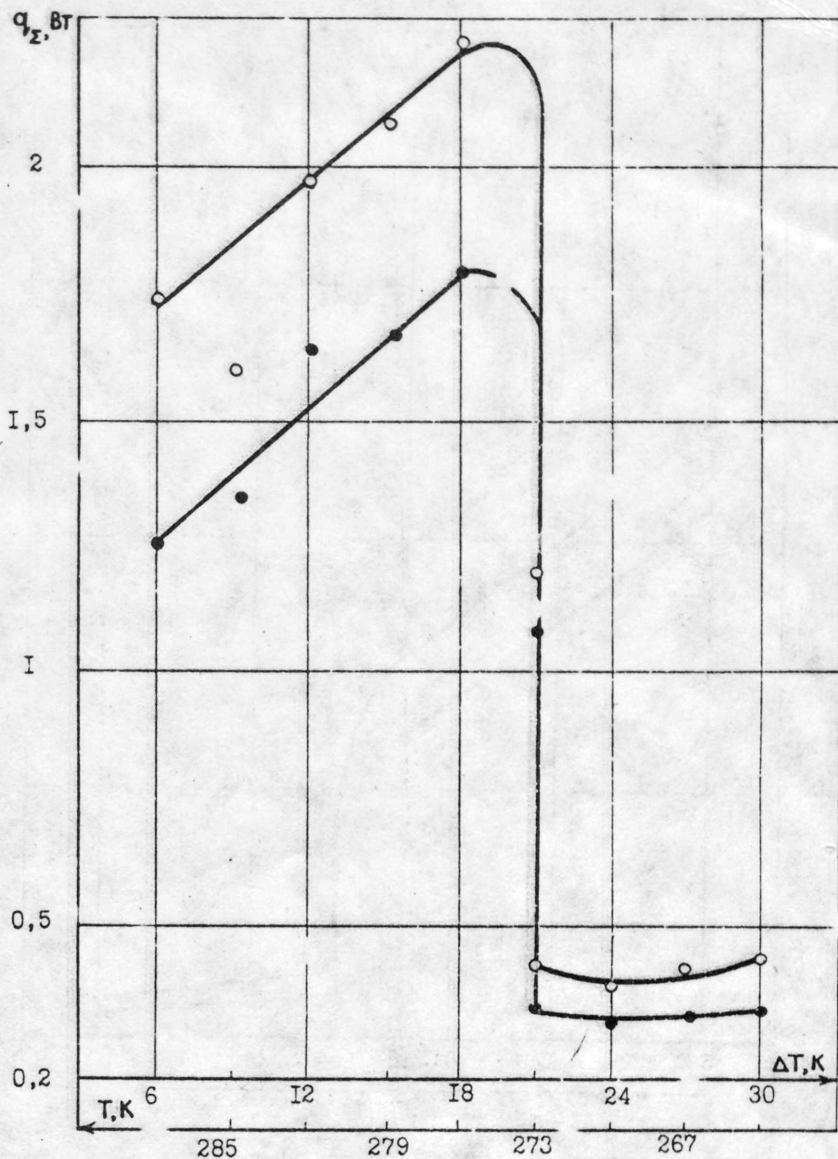


Рис. 3. Изменение суммарного теплопритока к смеси при контакте с алюминиевой подложкой: ○ — неэкранированной и ● — экранированной

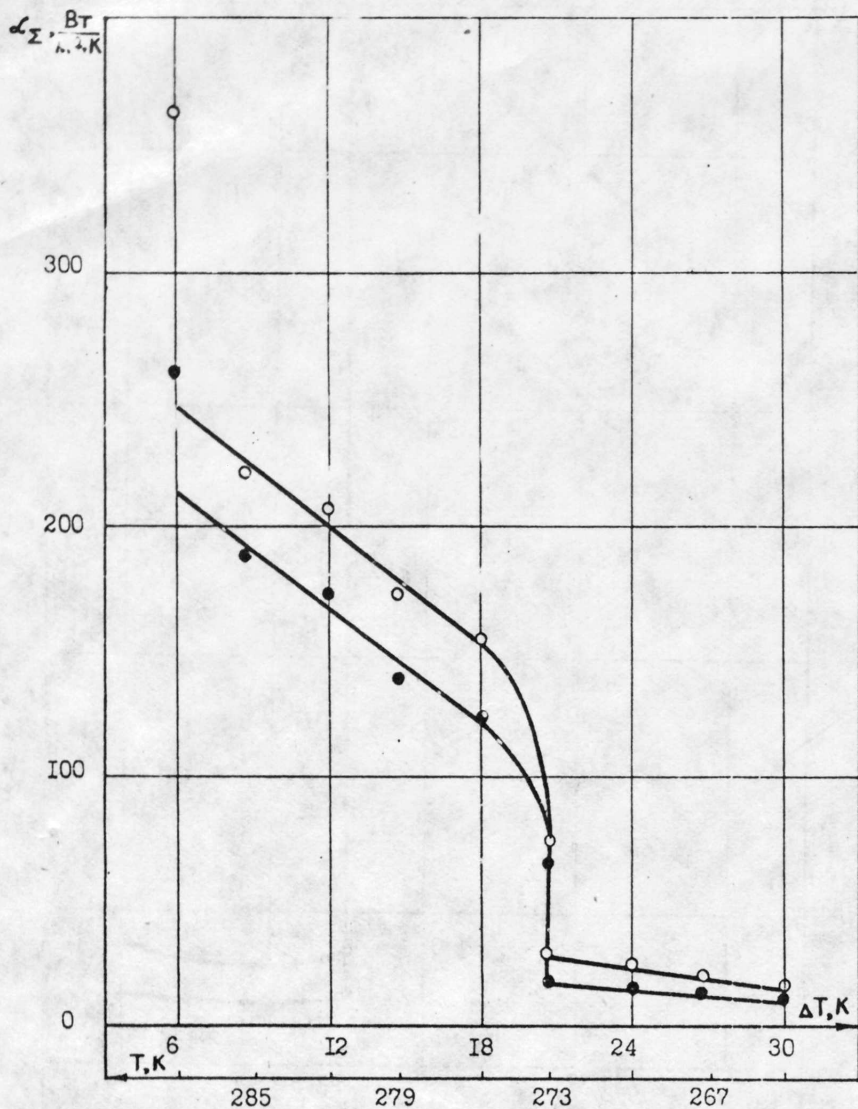


Рис. 4 . Изменение суммарного коэффициента теплопередачи для алюминиевой подложки: ○ — неэкранированной и ● — экранированной

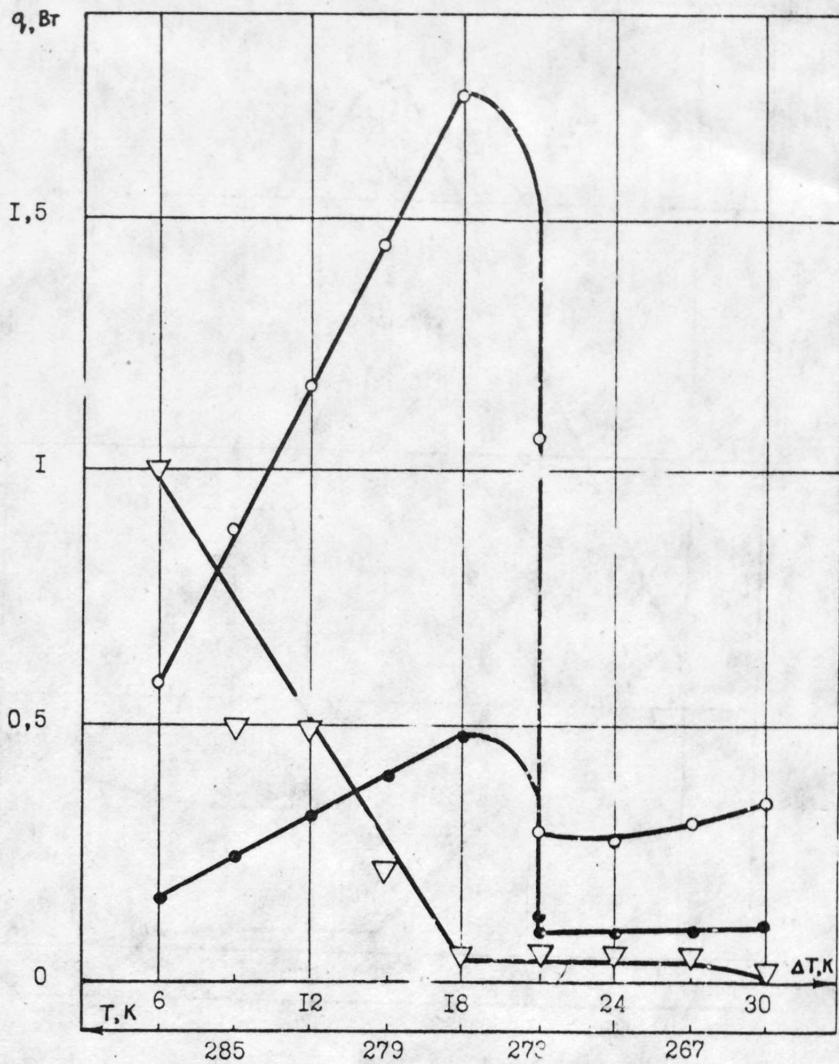


Рис. 5. Изменение составляющих теплопритока при контакте с неэкранированной алюминиевой подложкой:

○—○ $q_{\text{конт}}$; ●—● $q_{\text{изл}}$; ▽—▽ $q_{\text{конв}}$

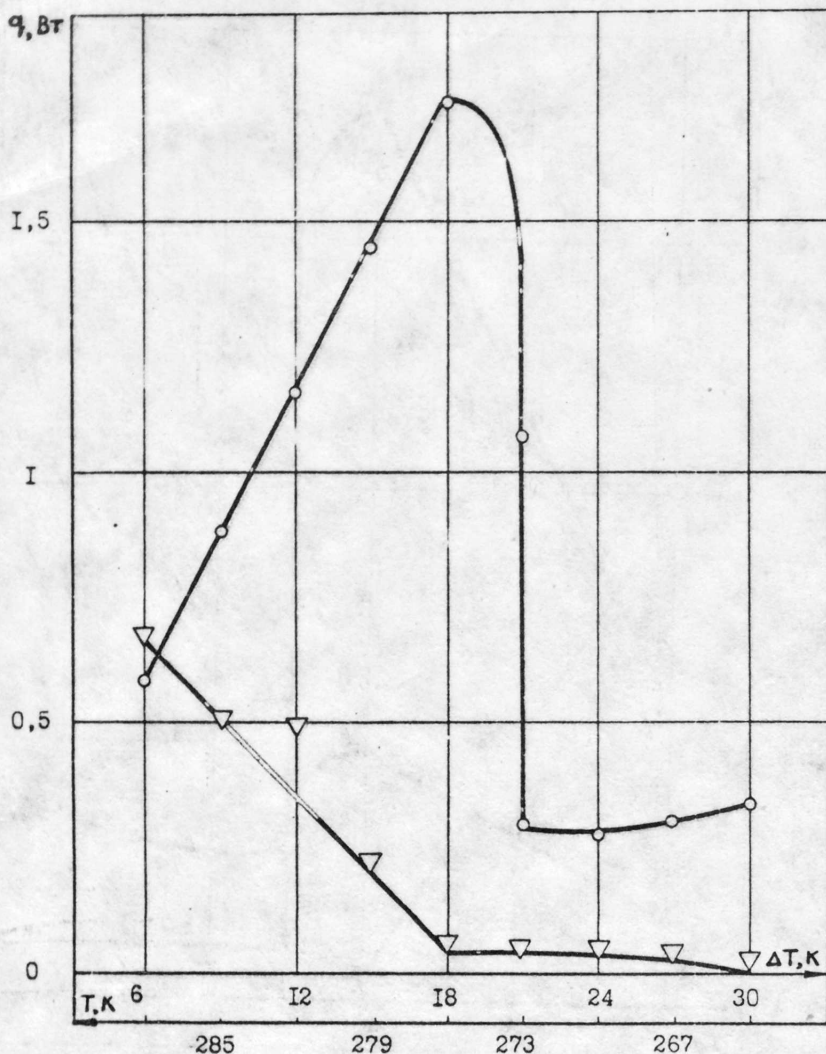


Рис. 6. Изменение составляющих теплопритока при контакте с экранированной алюминиевой подложкой: $\circ$ — q_{kont}
 ∇ — q_{conv}

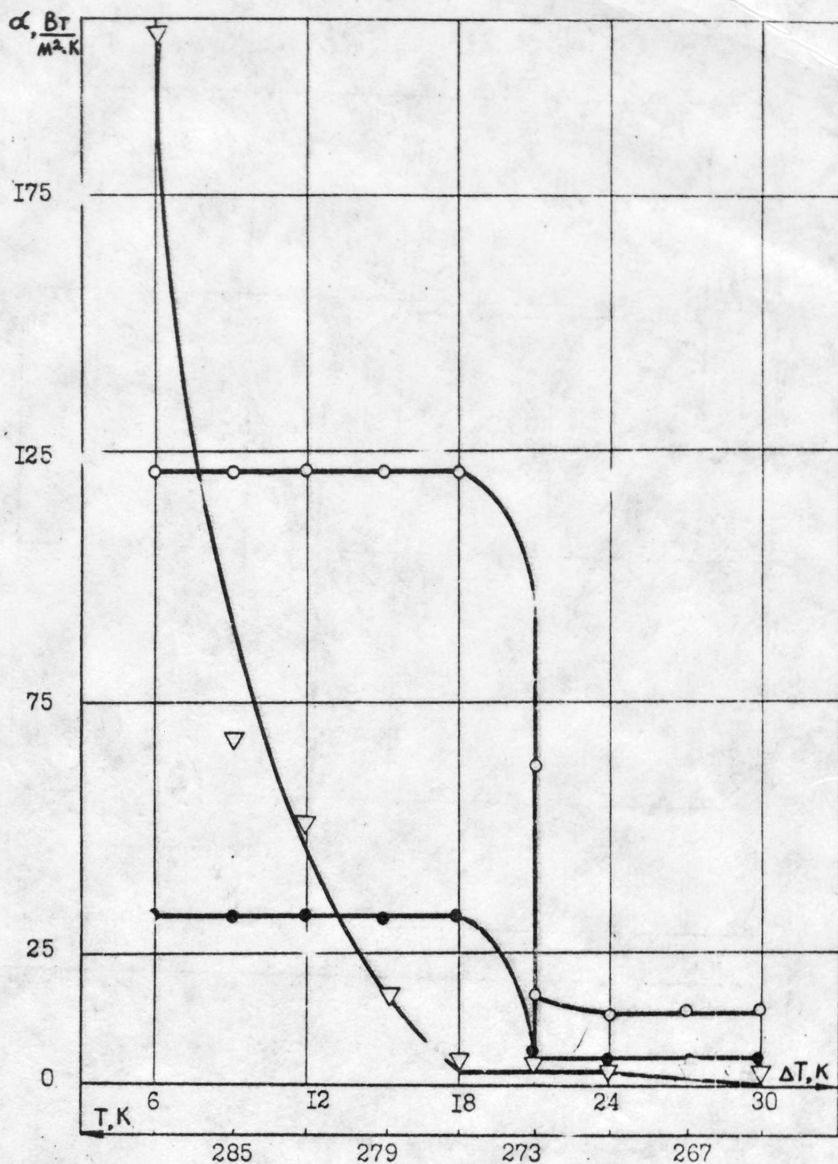


Рис. 7. Изменение составляющих коэффициента теплопередачи при контакте с неэкранированной алюминией и подложкой:

○ — $\alpha_{\text{КОНТ}}$; ● — $\alpha_{\text{ИЗЛ}}$; ▽ — $\alpha_{\text{КОНВ}}$

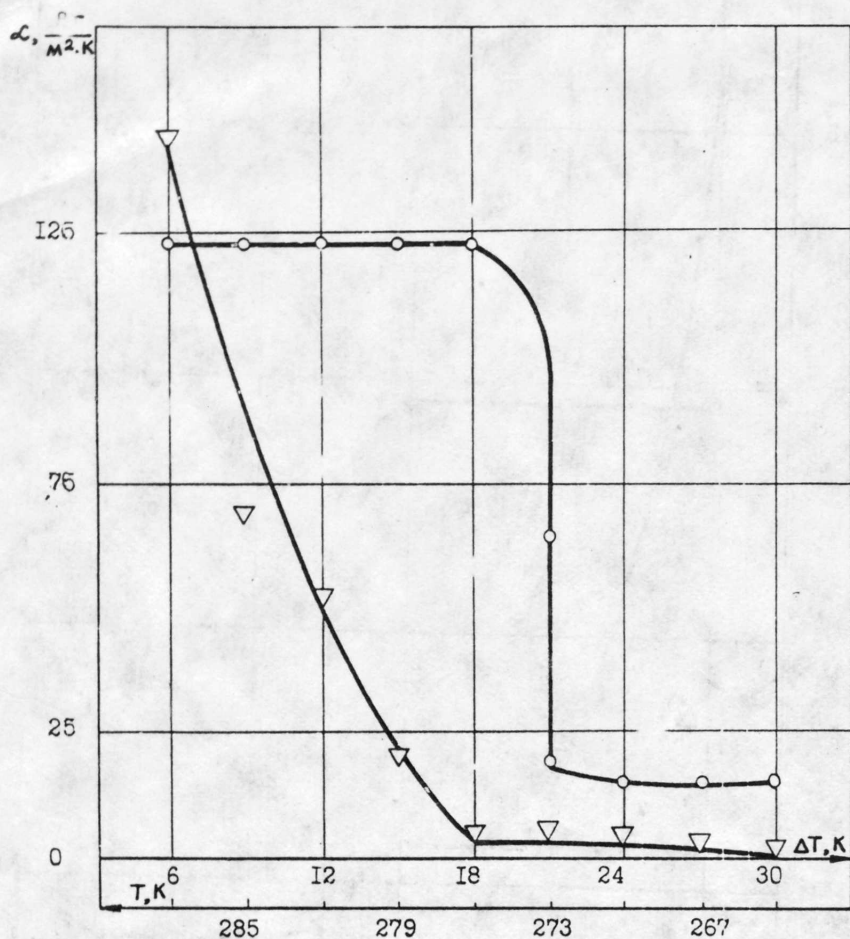


Рис. 8. Изменение составляющих коэффициента теплопередачи при контакте с экранированной алюминиевой подложкой:

○ — $\alpha_{\text{конт}}$; ▽ — $\alpha_{\text{конт}}$

нием общего теплопритока к примеси при увеличении температурного напора за счет сильного уменьшения суммарного коэффициента теплопередачи. Определение значения меньшей оптимальной скорости откачки производится по формуле

$$S_{opt} = \frac{KF\Delta\bar{T}}{\rho \cdot r} \quad (8)$$

Расчет по формуле (8) позволяет рассчитывать оптимальную скорость откачки паров капельной примеси при удалении из криогенной теплоизоляционной полости с относительной погрешностью не более 15%.

В пятой главе полученные теоретические и экспериментальные результаты применены для создания методики удаления примеси из криополости. Сформулированы некоторые принципиальные положения:

- процесс удаления загрязнений и процесс понижения давления в криополости необходимо рассматривать совместно, где главным процессом следует считать достижение требуемой глубины вакуума, а побочным процессом - удаление загрязнений. В определенном интервале давлений побочный процесс может выходить на первый план;
- удаление загрязнений желательно производить в жидкой фазе. Затвердевание загрязнений недопустимо;

- процесс удаления загрязнений необходимо производить при давлении минимально близком давлению кристаллизации;

- в результате удаления загрязнений необходимо добиться их удаления в такой степени, чтобы после прекращения вакуумной откачки давление в криополости не возросло выше предельно допустимого.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика вакуумирования загрязненных объемов ориентированная на промышленное использование для случаев контакта загрязнения с различными видами конструкционных материалов теплоизоляционных криополостей.

Вакуумирование по данной методике позволяет создать качественный вакуум за время, которое достаточно близко к теоретически возможному минимальному времени откачки загрязненного объема.

2. Выявлен общий характер поведения суммарного коэффициента теплопереноса к загрязнениям в зависимости от их температуры и давления. С ростом температурного напора суммарный коэффициент увеличивается для жидкого и твердого состояний загрязнений, где

для жидкой фазы этот рост выше, чем для твердой фазы, а при кристаллизации загрязнений происходит его значительное уменьшение.

3. Разработана методика определения локальных коэффициентов всех составляющих теплопереносов, что позволяет рассчитывать теплоприток к удаляемым загрязнениям в любой момент времени.

4. Обнаружено, что для каждого фазового состояния загрязнений (жидкое состояние, состояние кристаллизации, твердое состояние) существует своя оптимальная скорость вакуумной откачки паров.

Установлено, что оптимальная скорость откачки связана с существованием двух факторов: резким изменением площади контакта удаляемой влаги с материалом стенки во время кристаллизации и снижением общего теплопритока к примеси при увеличении температурного напора за счет сильного уменьшения суммарного коэффициента теплопередачи.

5. Разработан экспериментальный стенд для проведения комплекса исследований при вакуумировании загрязненных теплоизоляционных криополостей.

6. Даны рекомендации по способам расчета эффективной скорости откачки загрязненных криополостей, которые использованы в рабочих и нормативных материалах НПО "Криогенмаш".

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Иванов Б.А., Мелехин Д.П., Аль-амин И., Архипова Е.А. Вакуумная откачка криоосадка / Тез. докл. н-т. конф. "Состояние и перспективы развития вакуумной техники". Казань, 1991, 2 п.л.
2. Иванов Б.А., Альамин И., Архипова Е.В. Эффективность удаления влаги из теплоизолированных полостей промышленного оборудования. методом вакуумирования / Хим. и нефт. машиностроение, 1992, № 6, 1,5 п.л.

Подп. к печати 28.05.92 г. Объем 1 п. л. Тир. 100. Зак. 1074

Типография ЭОП МИХМа, ул. Старая Басманная, 21/4.