

М373273

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

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

На правах рукописи

МАХОНИН Валерий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КГМ С ОТВОДОМ ТЕПЛА НА ПРОМЕЖУТОЧНОМ
ТЕМПЕРАТУРНОМ УРОВНЕ

(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 ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

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

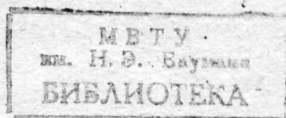


На правах рукописи

МАХОНИН Валерий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КГМ С ОТВОДОМ ТЕПЛА НА ПРОМЕЖУТОЧНОМ
ТЕМПЕРАТУРНОМ УРОВНЕ

(05.04.03 - гидравлические машины, машины и
аппараты холодильной и криогенной техники)



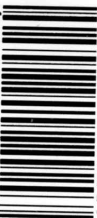
А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981 г.

М343243

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1373273

Махонин В. Д. Исследование К

Работа выполнена в Московском Ордена Ленина, Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
СУСЛОВ А.Д.

Научный консультант - кандидат технических наук,
с.н.с. ПОЛТАРАУС В.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор АКСЕЛЬРОД Л.С.
кандидат технических наук
с.н.с. БУТКЕВИЧ И.К.

Ведущее предприятие: указано в решении специализированного
Совета

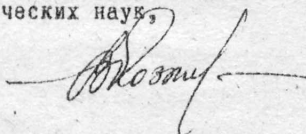
Защита диссертации состоится "___" _____ 198 г. в
_____ часов _____ мин. на заседании специализированного совета
К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, вакуум-
ные и компрессорные машины и аппараты" МВТУ им.Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д.1, кор-
пус факультета "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "___" _____ 198 г.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, прось-
ба высылать по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул.,
дом 5, специализированный Совет К.053.15.07.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат технических наук,
доцент

 Козлов В.Н.

Актуальность темы. В настоящее время криогенные системы на базе криогенных газовых машин (КГМ) широко используются в различных областях науки и техники: радио- и оптоэлектронике, вычислительной технике, вакуумных системах. Расширение области применения КГМ сопровождается ростом предъявляемых к ним требований, причем основное внимание уделяется повышению срока службы, надежности, эффективности, улучшению массогабаритных и пусковых характеристик, снижению уровня вибраций. Зачастую предпочтение отдается КГМ с раздельным выполнением узлов сжатия и расширения, в частности, КГМ, работающим по циклу Гиффорда-Мак-Магона. Несмотря на меньшую термодинамическую эффективность по сравнению с машинами, реализующими цикл Стирлинга, им присущи большой ресурс работы, удобство стыковки с охлаждаемым объектом, малый уровень вибраций. Для генерации холода на уровне $40+80$ К применяются одноступенчатые КГМ. При снижении уровня термостатирования необходимо использовать две и более ступеней охлаждения, что приводит к усложнению конструкции, снижению срока службы и надежности криогенной системы в целом, ухудшению массогабаритных и пусковых характеристик.

В связи с этим, на кафедре "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э.Баумана была предложена КГМ с отводом тепла на промежуточном температурном уровне (КГМ ОТПУ) за счет испарения криогенной жидкости. Имея один узел расширения, предложенная КГМ обладает всеми преимуществами одноступенчатых машин; компенсация части тепловых потерь на промежуточном температурном уровне позволяет осуществлять термостатирование на уровне, достигаемом с помощью двухступенчатых машин.

Цель работы. Подтверждение работоспособности КГМ ОТПУ, разработка методов расчета, получение рекомендаций для проектирования агрегатов, выявление путей повышения термодинамической эффективности.

Научная новизна. Впервые исследован рабочий процесс КГМ ОТПУ, разработана математическая модель машины, удовлетворительно согласующаяся с экспериментом. Впервые экспериментально исследован перенос тепла вытеснителем в КГМ, выявлено влияние эксцентриситета вытеснителя на величину потерь, разработана мето-

дика расчета потерь в сложных системах с отводом тепла от боковых стенок цилиндра.

Результаты работы. Исследование рабочего процесса КГМ ОТПУ позволило установить взаимосвязь между работой теплообменных аппаратов и влияние их эффективности на характеристики КГМ ОТПУ. Разработаны и реализованы на ЭВМ алгоритмы оптимизации низкотемпературного регенератора КГМ и расчета величины потерь от переноса тепла вытеснителем в КГМ ОТПУ. Установлено, что термодинамическая эффективность КГМ ОТПУ в 2-3 раза выше, чем у двухступенчатых КГМ, реализующих цикл Гиффорда-Мак-Магона. Установлено, что отвод тепла на промежуточном уровне позволяет сократить длительность пускового периода более чем в 2 раза. Получены экспериментальные данные по величине потерь от переноса тепла вытеснителем. На основании проведенного теоретического и экспериментального исследования предложена методика расчета КГМ ОТПУ.

Практическая ценность. Получены рекомендации по расчету и проектированию машин с промежуточным отводом тепла. Экспериментально проверены конструкции узлов, специфичных только для предлагаемой машины. По результатам проведенных исследований и полученным рекомендациям разработан и изготавливается криогенератор для криогенного вакуумного насоса с температурой охлаждения криопанели на уровне 20 К. Результаты исследований использованы также при выполнении научно-исследовательских тем кафедры, направленных на создание высокоэффективных систем низкотемпературного термостатирования.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технических семинарах кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1980 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции по холоду "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (Ташкент, 1977 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (М., 1980 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано

3 статьи, получено I положительное решение Госкомитета по делам открытий и изобретений на выдачу авторского свидетельства СССР.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 124 страницах машинописного текста, включает введение, 4 главы, иллюстрирована 46 рисунками. Библиография содержит 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены принцип действия и особенности рабочего процесса КГМ ОТПУ, области применения, проведен анализ методов исследования и расчета КГМ со встроенными теплообменными аппаратами.

На рис. I представлена принципиальная схема исследуемой КГМ

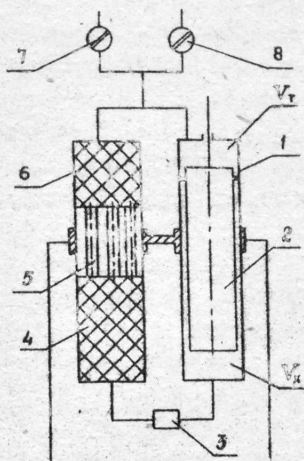


Рис. I. Схема КГМ ОТПУ

ОТПУ. В цилиндре I расположен вытеснитель 2, разделяющий объем цилиндра на теплую V_g и холодную V_x полости, которые гидравлически связаны между собой через теплообменник нагрузки 3, нижний регенератор 4, теплообменник промежуточного охлаждения 5 и верхний регенератор 6. Впуск и выпуск рабочего газа осуществляется с помощью клапанов 7 и 8, работа которых синхронизирована с перемещением вытеснителя. Рабочие процессы в теплой V_g и холодной V_x полостях аналогичны процессам, протекающим

в полостях одноступенчатой КГМ, реализующей цикл Гиффорда-Мак-Магона. Отличие КГМ ОТПУ от обычной двухступенчатой машины заключается в том, что в ней роль первой ступени выполняет теплообменник промежуточного охлаждения. В машине имеется только одна полость расширения. Исключен наименее надежный элемент - уплотнение, работающее в холодной зоне. Компенсация тепловых потерь и полезная нагрузка на промежуточном температурном уровне обеспечиваются за счет испарения криогенной жидкости (азот, воз-

дух, кислород, криогенное топливо). Использование машины целесообразно в системах, где наличие криогенной жидкости является технической необходимостью. КГМ ОТПУ может быть применена также в качестве криогенатора мощного криогенного вакуумного насоса с быстротой откачки более 5000 л/с.

Компенсация части тепловых потерь на промежуточном температурном уровне за счет криогенной жидкости широко используется в циклах глубокого охлаждения. Исследование возможности применения этого принципа в КГМ не проводилось.

Введение промежуточного охлаждения криогенной жидкостью в КГМ ОТПУ привело к появлению блока теплообменных аппаратов — верхний регенератор, теплообменник промежуточного охлаждения, нижний регенератор. Взаимное влияние рабочих процессов, происходящих в трех встроенных разнородных аппаратах не исследовалось. Отсутствуют рекомендации по расчету и выбору рациональных параметров каждого аппарата и всего блока в целом.

Потери от переноса тепла вытеснителем составляют значительную долю в общем тепловом балансе тихоходных КГМ. Рекомендации по их определению носят противоречивый характер. Отсутствие экспериментальных данных, полученных в условиях, близких к условиям работы КГМ, не позволяет отдать предпочтение какой-либо из предложенных зависимостей. Для КГМ ОТПУ достоверное определение величины потерь от переноса тепла вытеснителем тем более важно, поскольку, во-первых, цилиндр машины находится при значительном перепаде температур, что увеличивает потери от теплопереноса; во-вторых, наличие промежуточного охлаждения позволяет компенсировать часть потерь от теплопереноса на промежуточном температурном уровне. Последнее в известных работах не рассматривалось.

Анализ литературных данных, посвященных методам исследования и расчета КГМ со встроенными теплообменными аппаратами показал, что наиболее рациональным для исследования действительного цикла КГМ ОТПУ является метод дифференцированного определения потерь, предложенный профессором А.Д.Сусловым и экспериментально проверенный при исследовании различных типов КГМ. В данной работе метод получил дальнейшее развитие применитель-

но к КГМ ОТПУ.

На основании проведенного анализа были определены следующие задачи исследования:

1. Разработка и исследование математической модели действительного цикла. Анализ влияния эффективности теплообменных аппаратов на характеристики машины.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование потерь от переноса тепла вытеснителем, включая случай с компенсацией части потерь на промежуточном температурном уровне.

3. Разработка, создание и экспериментальное исследование опытного образца КГМ ОТПУ. Получение рекомендаций по расчету и конструированию КГМ ОТПУ.

Во второй главе проведен анализ действительного цикла КГМ ОТПУ. Особое внимание уделено влиянию параметров блока теплообменных аппаратов на эффективность машины.

В машинах, работающих по циклу Гиффс-да-Мак-Магона, можно пренебрегать пульсационными эффектами. Количество холода, произведенного расширяющимся газом в холодной полости (располагаемая холодопроизводительность): $Q_p = \rho_u Q_t$; где ρ_u - коэффициент полноты индикаторной диаграммы, Q_t - холодопроизводительность в теоретическом цикле. Действительная холодопроизводительность:

$Q_d = Q_p - \sum \Delta Q$, где $\sum \Delta Q$ - сумма тепловых потерь, вычисленных в предположении равенства расходов и температурных перепадов в аппаратах действительной и теоретической машинах. Применительно к КГМ ОТПУ сумма тепловых потерь, компенсируемых на нижнем температурном уровне:

$$\sum \Delta Q = \Delta Q_{pн} + \Delta Q_{тн} + \Delta Q_{тпн} + \Delta Q_{гвб} + \Delta Q_{гпо}$$

где: $\Delta Q_{pн}$ - суммарные тепловые потери от несовершенства процессов в нижнем регенераторе; $\Delta Q_{тн}$ - суммарные тепловые потери от теплопритоков по элементам конструкции и через изоляцию с промежуточного уровня $T_{пр}$ на уровень охлаждения $T_{ох}$; $\Delta Q_{тпн}$ - потери от переноса тепла вытеснителем с промежуточного уровня $T_{пр}$ на уровень охлаждения $T_{ох}$; $\Delta Q_{гвб}$, $\Delta Q_{гпо}$ - потерь холодопроизводительности от гидравлического сопротивления верхнего регенератора и

теплообменника промежуточного охлаждения соответственно.

Тепло, отведенное к испаряющейся жидкости в зоне промежуточного охлаждения:

$$Q_{пр} = (\Delta Q_{рв} - \Delta Q_{рн}) + (\Delta Q_{тв} - \Delta Q_{тн}) + (\Delta Q_{тлв} - \Delta Q_{тлн}) - (\Delta Q_{грв} - \Delta Q_{грн}),$$

где: $\Delta Q_{рв}$ - суммарные тепловые потери от несовершенства процессов в верхнем регенераторе; $\Delta Q_{тв}$ - суммарные тепловые потери от теплопритоков по элементам конструкции и из окружающей среды с уровня температуры окружающей среды $T_{от}$ на уровень $T_{пр}$; $\Delta Q_{тлв}$ - потери от переноса тепла вытеснителем с уровня $T_{от}$ на уровень $T_{пр}$; $\Delta Q_{грн}$ - потери от гидравлического сопротивления нижнего регенератора.

Тепловые потери в регенераторах КГМ наиболее сложны для аналитического определения и составляют наибольший удельный вес в суммарных потерях. В регенераторах I-й ступени КГМ используются сетчатые насадки из латуни или бронзы, теплоемкость которых при понижении температуры резко падает, что приводит к необходимости применения в регенераторах 2-й ступени КГМ насадок из свинцовой дробы. Гидравлическое сопротивление свинцовой дробы в 2 + 4 раза выше, чем у сетчатой насадки, но она обладает более высокими значениями удельной теплоемкости. В литературе отсутствуют рекомендации по выбору соотношений между насадкой из свинцовой дробы и сеткой в низкотемпературном регенераторе.

Исследование работы нижнего регенератора было направлено на поиск рационального соотношения масс различных видов насадок. При определении тепловых потерь от несовершенства теплообмена был использован метод замены действительного регенератора эквивалентным, предложенный профессором А.Д.Сусловым. Непосредственное использование метода не представляется возможным, поскольку насадки имеют различные геометрические характеристики. Поэтому была разработана методика расчета, согласно которой регенератор разбивается на два отдельных аппарата, заполненных однородной насадкой, каждый из которых может быть рассчитан по известному методу. Незвестная температура $T_{гр}$ на границе между аппаратами определяется из условия равенства потерь от недоокупа на холодном конце регенератора, заполненного сет-

чатой насадкой, и теплом конце регенератора, заполненного свинцовой дробью. Задача решалась методом последовательных приближений на ЭВМ МИР-2. В качестве переменных были приняты: относительный "мертвый" объем нижнего регенератора; диаметр нижнего регенератора; соотношение между "мертвыми" объемами сетки и свинцовой дроби. В результате проведенного исследования установлено, что вынесенный регенератор при работе в диапазоне температур $78 + 20$ К рационально весь заполнять свинцовой дробью. Размещение регенератора в вытеснителе накладывает ограничение на диаметр аппарата, возрастает относительная величина потерь от гидравлического сопротивления. В этом случае заполнение сеткой верхней части регенератора сокращает суммарную величину потерь.

Потери от несовершенства теплообмена в теплообменнике промежуточного охлаждения и верхнем регенераторе не входят непосредственно в выражение, определяющее Q_A , однако неудовлетворительная работа названных аппаратов приводит к повышению температуры газа прямого потока на входе в нижний регенератор, что в свою очередь вызывает увеличение тепловой нагрузки нижнего регенератора и тепловых потерь от недорекуперации. Анализ работы теплообменника промежуточного охлаждения показал, что температура газа на входе в нижний регенератор определяется как эффективностью теплообменника, так и соотношением между недорекуперациями в верхнем и нижнем регенераторах. Таким образом, взаимосвязь между работой теплообменных аппаратов приводит к необходимости их совместного анализа. Снижение потерь от неидеальности теплообмена в аппаратах сопряжено с увеличением их теплообменной поверхности, а следовательно с увеличением "мертвых" объемов аппаратов и расхода газа через машину. Поэтому в качестве критерия оценки эффективности работы теплообменных аппаратов был принят термодинамический к.п.д. КГМ ОТПУ:

$$\eta_A = \frac{Q_A}{M \frac{1}{\eta_{из}} R T_{ог} L_1 \frac{1}{\sigma} + G L_0} \frac{T_{ог} - T_{ох}}{T_{ох}}$$

где: M - расход газа через машину; $\eta_{из}$ - изотермический к.п.д. компрессора; $\sigma = P_{вып}/P_{вх}$ - отношение давлений выпуска и

впуска; G — расход криогенной жидкости, l_0 — удельные затраты на ее производство.

Поиск оптимальных геометрических размеров теплообменных аппаратов начинался с расчета нижнего регенератора, поскольку расход газа через нижний регенератор не зависит от "мертвых" объемов теплообменника промежуточного охлаждения и верхнего регенератора. При различных сочетаниях размерных соотношений теплообменника промежуточного охлаждения и верхнего регенератора были определены оптимальные геометрические размеры нижнего регенератора. Далее, при фиксированном нижнем регенераторе был проведен поиск оптимальных размеров теплообменника промежуточного охлаждения и верхнего регенератора. В результате анализа действительного цикла КГМ ОТПУ установлено, что при использовании традиционных насадок рациональные значения "мертвого" объема нижнего регенератора составляют $(1,0 + 1,1)V_0$ (V_0 — объем полости расширения); верхнего регенератора — $(2,0 + 2,2)V_0$; теплообменника промежуточного охлаждения — $(0,15 + 0,25)V_0$.

Как показали проведенные расчеты, термодинамический к.п.д. КГМ ОТПУ составляет 7,4%, что в 2 + 3 раза превышает к.п.д. двухступенчатых машин, реализующих цикл Гиффорда-Мак-Магона (при температуре термостатирования 20 К) и приближается к к.п.д. двухступенчатых машин Стирлинга. Это объясняется тем обстоятельством, что в предложенной машине значительная часть тепловых потерь компенсируется за счет жидкого азота, получаемого на крупных промышленных установках, обладающих высокой эффективностью.

В третьей главе содержится материал, посвященный исследованию потерь от переноса тепла вытеснителем.

По некоторым оценкам потери от переноса тепла вытеснителем могут достигать 25% от теоретической холодопроизводительности КГМ. Анализ явления показывает, что строгое математическое решение пока не представляется возможным. В известных работах предлагаются зависимости простого вида, удобные для инженерных расчетов, полученные при ряде допущений. Несоответствие принятой модели действительному протеканию процесса учитывается введением поправочных коэффициентов. Последние в ряде работ получены из сравнения упрощенной зависимости с результатами численного решения на ЭВМ. Такой подход имеет тот недостаток, что расчет на

ЭВМ сопряжен со значительными затратами машинного времени, а результат имеет частный характер и может быть использован при расчете машин, близких по своим параметрам к машинам, для которых были проведены расчеты.

Величины потерь от переноса тепла вытеснителем, определенные по зависимостям, предложенным различными авторами различаются более чем в 4 раза, причем наблюдается не только количественное, но и качественное различие. Критерием оценки достоверности предложенных зависимостей может быть только эксперимент, проведенный при условиях, близких к имеющим место в КГМ. В связи с этим был разработан метод и установка для экспериментального определения величины потерь от переноса тепла вытеснителем.

Установка содержит цилиндр, аналогичный цилиндрам КГМ, внутри которого расположен вытеснитель с уплотнением на теплом конце. Теплый конец цилиндра имеет температуру окружающей среды, а холодный находится в тепловом контакте с резервуаром жидкого азота и поддерживается при температуре кипения жидкого азота. Теплая и холодные полости цилиндра соединены между собой через регенератор и теплообменник, находящийся в тепловом контакте с жидким азотом. Низкотемпературная часть установки помещена в вакуумную камеру. Вытеснитель через шток связан с приводным механизмом, позволяющим изменять число двойных ходов в пределах $0,65 \pm 1,5 \text{ с}^{-1}$. При неподвижном вытеснителе после стабилизации температур определяется количество испаряющегося азота в единицу времени, т.е. производится тарировка установки. После включения привода вытеснитель начинает осуществлять возвратно-поступательное движение, перенося тепло с уровня температуры окружающей среды на азотный уровень, что приводит к увеличению количества испарившейся жидкости. По разнице количеств испарившейся жидкости в режиме эксперимента и при тарировке, с учетом потерь в регенераторе определяется величина потерь от переноса тепла вытеснителем. Для изменения величины зазора между цилиндром и вытеснителем использовались вытеснители различных диаметров. Величина зазоров составляла: 0,18; 0,29; 0,5; 0,72 мм. Проведенная оценка точности измерений показала, что максимальная относительная средняя квадратическая погрешность в определении ве-

личины потерь от переноса тепла вытеснителем не превышала $\pm 8,3\%$.

Анализ экспериментальных данных показал, что наиболее хорошо согласуется с экспериментальными данными зависимость, предложенная А.Д.Сусловым и В.П.Сивковым, которая получена в результате строгого аналитического решения при определении закона изменения температуры в поверхностном слое стенок цилиндра и вытеснителя. Потери от переноса тепла вытеснителем с учетом того обстоятельства, что вытеснитель может располагаться в цилиндре эксцентрично:

$$Q_{\text{тп}} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_r D_{\text{ц}} S^2 (T_0 - T_x)}{l_v} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{A_{\text{ц}} A_v}{\delta} d\varphi \quad (I.)$$

где: λ_r - теплопроводность газа в зазоре между цилиндром и вытеснителем; $D_{\text{ц}}$ - диаметр цилиндра; S, l_v - ход и длина вытеснителя; T_0, T_x - температуры на концах цилиндра; $A_{\text{ц}}, A_v$ - коэффициенты, учитывающие колебания на стенках цилиндра и вытеснителя; $\delta = \delta_0 + e \cos \varphi$ - радиальный зазор между цилиндром и вытеснителем, переменный по длине окружности; δ_0 - зазор в случае $e=0$; e - эксцентриситет; $\delta_0 = \delta_n + \delta_k$; δ_n - номинальный геометрический зазор; $\delta_k = \frac{1}{2} (h_{\text{max}1} + h_{\text{max}2})$; $h_{\text{max}1}$ и $h_{\text{max}2}$ - высота микронеровностей поверхностей цилиндра и вытеснителя.

Проведенные расчеты показали, что с увеличением e возрастание $Q_{\text{тп}}$ тем интенсивнее, чем больше значение числа двойных ходов вытеснителя и δ_0 . Например, при $e = e_{\text{max}}$ и числе двойных ходов вытеснителя 1,2 с T , величина $Q_{\text{тп}}$ увеличивается в 1,2 раза для $\delta_0 = 0,18$ мм и в 2,0 раза для $\delta_0 = 0,72$ мм. Поскольку величина эксцентриситета не поддается контролю при работе КГМ, рационально давать пределы возможных значений $Q_{\text{тп}}$. При этом нижняя граница значений $Q_{\text{тп}}$ соответствует $e=0$, верхняя - $e = e_{\text{max}}$.

В КГМ ОТПУ величина $Q_{\text{тп}}$ может быть снижена за счет установки на цилиндре КГМ втулки, охлаждаемой криогенной жидкостью. Для определения величины потерь, рациональных размеров втулки и ее месторасположения на цилиндре была разработана модель, в основу которой положена зависимость (I.) В результате

существующая схема была сведена к задаче о теплопроводности в стержне условного сечения S_y с отводом тепла от боковой поверхности на участке $S + \Delta$ (Δ - высота втулки), причем интенсивность отвода тепла определяется значением коэффициента теплопередачи в зазоре и законом движения вытеснителя в цилиндре. При соответствующих допущениях, процесс передачи тепла в принятой модели описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} T_1'' &= 0; & l_1 &\gg x \gg 0 \\ T_2'' &= A \arccos\left(1 - 2 \frac{x - l_1}{S}\right) (T_2 - T_{np}); & l_2 &\gg x \gg l_1 \\ T_3'' &= A [\arccos(1 - 2 \frac{x - l_2}{S}) - \arccos(1 - 2 \frac{x - l_2 - \Delta}{S})] (T_3 - T_{np}); & l_3 &\gg x \gg l_2 \\ T_4'' &= A [\pi - \arccos(1 - 2 \frac{x - \Delta - l_3}{S})] (T_4 - T_{np}); & l_4 &\gg x \gg l_3 \\ T_5'' &= 0; & l_5 &\gg x \gg l_4 \end{aligned}$$

где: $A = \frac{2}{A_4 A_8 S^2}$; l_1, l_4 - длины участков цилиндра, определяемые размерами втулки Δ и ее месторасположением на цилиндре;

T_1, T_5 - температура участков. Поскольку уравнения 2.4 приведенной выше системы нелинейны и в квадратурах не интегрируются, то было проведено численное решение системы методом Рунге-Куты на ЭВМ ЕС-1022. Программа была составлена на Фортране-IV. В результате расчетов установлено, что величина $Q_{тн}$ может быть ниже более чем в 2 раза. Были определены также рациональные размеры втулки: $\bar{\Delta} = 0,3 + 0,5$ ($\bar{\Delta} = \Delta/S$ - относительная высота втулки) и ее месторасположение на цилиндре $\bar{l} = 0,45 + 0,6$ ($\bar{l} = l_5/l_5$; l_5 - расстояние втулки от теплового конца цилиндра). Предложена упрощенная методика определения $Q_{тн}$ для КГМ ОТПУ, которая в рациональном диапазоне изменения $\bar{l}$ и $\bar{\Delta}$ дает погрешность не более 15% от численного решения.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию КГМ ОТПУ. В главе приведено описание опытного образца КГМ ОТПУ, экспериментального стенда и характеристик контрольно-измерительной аппаратуры; методика проведения экспериментальных исследований и оценка погрешностей измерения.

Для экспериментального исследования был разработан и изгото-

товлен опытный образец машины с вынесенными теплообменными аппаратами. Такое исполнение облегчает задачу создания теплообменных аппаратов с наиболее рациональными геометрическими размерами, а также позволяет производить детальную отработку элементов и узлов КГМ. Опытный образец соответствует схеме, приведенной на рис. I и состоит из двух частей: низкотемпературной и механизма привода вытеснителя с органами газораспределения. Диаметр цилиндра 33 мм, ход вытеснителя 30 мм. В качестве насадки верхнего регенератора была использована сетка из фосфористой бронзы № 007I (ГОСТ 6613-73); нижний регенератор заполнен свинцовой дробью с диаметром шапиков 0,25 мм, верхняя его часть - сеткой № 004 (ГОСТ 6613-73). Теплообменник промежуточного охлаждения прямотрубный, диаметр трубок 2 мм, толщина стенки 0,15 мм; количество - 113 штук. Конструкция низкотемпературной части выполнена разборной. Привод вытеснителя кривошипно-шатунного типа позволяет изменять число двойных ходов вытеснителя в диапазоне 60+110 в минуту. Конструкция механизма газораспределения позволяет устанавливать кулачки с различным опережением открытия клапанов вблизи "мертвых" точек.

Экспериментальный стенд состоял из газовой магистрали, вакуумной системы, системы подачи жидкого азота и контрольно-измерительной аппаратуры. Во время экспериментов проводились замеры давлений, температур, потребляемой электрической мощности, расхода гелия через машину и расхода жидкого азота. Проводилось индицирование тепловой полости КГМ по давлению с записью диаграмм на быстродействующем приборе Н 338-8.

В результате экспериментального исследования доказана работоспособность КГМ ОТПУ. Минимальная температура охлаждения, достигнутая в экспериментальном образце, составляла 19 К. Несмотря на завышенный "мертвый" объем КГМ, обусловленный исследовательским характером экспериментального образца, термодинамический к.п.д. машины составлял 3,8% на уровне 25 К при полезной холодопроизводительности 5 Вт. Расчетные характеристики КГМ ОТПУ удовлетворительно согласуются с результатами экспериментального исследования, что подтверждает правильность выбора математической модели. Так, расхождение расчетных и экспериментальных зна-

чений по расходу гелия через машину составляет не более 12%, по значению термодинамического к.п.д. не более 25% при температуре термостатирования ≥ 22 К. Время выхода на режим КГМ ОТПУ составило в 2,5 - 5 раз меньше, чем у двухступенчатых машин, реализующих цикл Гиффорда-Мак-Магона.

Основные положения методики расчета КГМ ОТПУ и практические рекомендации были использованы при разработке криогенатора вакуумной системы для нанесения тонких пленок.

ВЫВОДЫ

1. Предложена КГМ с отводом тепла на промежуточном температурном уровне (КГМ ОТПУ). Предпочтительными областями применения КГМ ОТПУ является вакуумная техника и транспортные системы с коротким пусковым периодом.

2. Отвод тепла к криогенной жидкости позволяет сократить пусковой период более чем в 2 раза и увеличить к.п.д. экспансионной машины (машины Гиффорда) в 2 + 3 раза. Последнее объясняется использованием холода жидкого азота, получаемого на крупных установках, обладающих высокой эффективностью.

3. Впервые проведено экспериментальное исследование потерь от переноса тепла вытеснителем в КГМ. Установлено, что эксцентричное расположение вытеснителя в цилиндре увеличивает потери в 1,2 + 2 раза. Наилучшее качественное и количественное совпадение с экспериментом дает аналитическая зависимость, предложенная А.Д.Сусловым и В.П.Сивковым.

4. Установка теплоотводящих втулок на цилиндре КГМ ОТПУ позволяет сократить перенос тепла вытеснителем в зону низких температур более чем в 2 раза. Разработана расчетная методика, позволяющая определять месторасположение и рациональные размеры теплоотводящих втулок. Применительно к азотному охлаждению, рациональное расстояние от теплого конца цилиндра составляет 0,45 + 0,6 от длины вытеснителя; высота втулки 0,3 + 0,5 от хода вытеснителя.

5. Предложенная математическая модель КГМ ОТПУ удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Расчетные и опытные значения расхода гелия через машину различаются не более

чем на 12%; к.п.д. на 25%.

6. Создан опытный образец КГМ ОТПУ. Проверена работоспособность новых элементов и всей конструкции в целом. Получены рекомендации по расчету и проектированию КГМ ОТПУ. Результаты исследования использованы при проектировании криогенератора вакуумного криогенного насоса на 20 К.

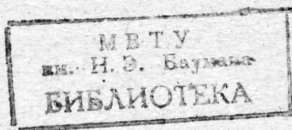
Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Махонин В.Д. Исследование вопроса теплопереноса в ГХМ. Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции по холоду "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха". Ташкент, 1977, с.64.

2. Махонин В.Д., Полтараус В.Б. Перенос тепла вытеснителем в ГХМ с промежуточным охлаждением. Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении". М., 1980, с.12.

3. Глухов С.Д., Полтараус В.Б., Зиков В.М., Махонин В.Д., Ермаков Н.Д. Криогенный вакуумный насос. Химическое и нефтяное машиностроение. 1980, № 9, с.13-14.

4. Положительное решение по заявке № 2975356/06 от 30.08.80. Холодильно-газовая машина./Суслов А.Д., Глухов С.Д., Зиков В.М., Ермаков Н.Д., Полтараус В.Б., Махонин В.Д.



Л-85858 от 18/II-81г.

Заказ 160 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, в-5, 2-я Бауманская, 5.