

М 315904

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

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

На правах рукописи

ГУНЬКО Юрий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН С ПОДВОДОМ ТЕПЛА НА
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ

(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

1977 г.

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

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

На правах рукописи

ГУНЬКО Юрий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН С ПОДВОДОМ ТЕПЛА НА
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ

(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

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1315904

Гулько Ю. И. Исследование р

Москва

1977 г.

Работа выполнена в Омском политехническом институте

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор СУСЛОВ А.Д.,
кандидат технических наук, доцент ГОРОХОВСКИЙ Г.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Пронько В.Г.
кандидат технических наук, с.н.с. Зыков В.М.

Ведущее предприятие - указано в решении Ученого
Совета.

Защита диссертации состоится "16" мая 1977 г.
на заседании специализированного совета "Криогенные,
холодильные, гидравлические и вакуумные машины и аппа-
раты" при Московском ордена Ленина и ордена Трудового
Красного знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Ба-
умана по адресу:

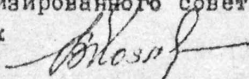
107005, Москва, В-5, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МВТУ им. Баумана.

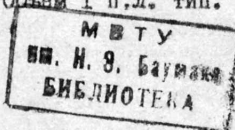
Автореферат разослан "9" марта 1977 г.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат технических наук



В.Н. КОЗЛОВ

Л79516 подл. к печ. 2.Ш.1977. Объем 1 п.л. тип. МВТУ, зак.450, тир.100



В в е д е н и е

Актуальность проблемы. Газовые холодильные машины (ГХМ), работающие по обратному циклу Стирлинга, являются одним из наиболее эффективных и компактных генераторов низкотемпературного холода в криогенных системах. Дальнейшее совершенствование подобных систем — один из путей успешного выполнения решений XXV съезда КПСС о развитии теоретических и экспериментальных исследований в области низких температур.

Однако, в рассматриваемых схемах все затраты холода, приходящиеся на различные температурные уровни, покрываются за счет холода, генерируемого машиной, как правило, при самой низкой температуре в системе. Поэтому, несмотря на многочисленные работы, посвященные исследованию и применению ГХМ, вопросы, связанные с повышением эффективности их использования, являются весьма актуальными.

Основным направлением повышения экономичности установок является снижение потерь от необратимости процессов в машинах и аппаратах. Существенное повышение эффективности может быть достигнуто за счет использования ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. К ним относятся машины со встроенными в регенератор теплообменниками и с отбором части холодного рабочего тела из полостей расширения ГХМ.

Цель исследования. Целью работы явилось комплексное исследование процессов в газовых холодильных машинах с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях, развитие метода их анализа и разработка практических рекомендаций по применению и проектированию подобных машин.

Методы исследования. В теоретическом исследовании использован метод термодинамического анализа. Численное решение системы дифференциальных уравнений для полостей и аппаратов ГХМ и оптимизация криогенных систем выполнены с применением ЭВМ.

Для экспериментального исследования использованы машины, позволяющие распространить полученные результаты

как на микросистемы, так и на крупные криогенные установки с ГХМ. Методика исследования предусматривала возможность изучения влияния подвода тепла на промежуточных температурных уровнях на внутренние и внешние параметры одноступенчатых машин при различных режимах их работы. Анализ результатов эксперимента проводился с использованием метода наименьших квадратов.

Научная новизна. Представленная система дифференциальных уравнений позволяет проводить анализ нестационарных процессов в рабочих полостях машины.

Получены зависимости для определения температур в промежуточных сечениях регенератора. Теоретически и экспериментально показана возможность существенного повышения эффективности криогенных систем при использовании ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. Получены теоретические и опытные зависимости характеристик охладителя воздуха от количества отбираемого рабочего тела, а также зависимость внешних и внутренних параметров от количества и уровня подводимого тепла при различных режимах работы машины.

Практическая ценность. Получены зависимости для расчета и анализа ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. Экспериментально подтверждена возможность повышения производительности серийной ГХМ ЗИФ-1000 более чем на 28% без увеличения потребляемой мощности. Разработан, создан, испытан и передан заказчику образец микроохладителя с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. Предложены схемы воздухоразделительных установок, гелиевых охладителей и рефрижераторов, построенных на базе рассматриваемых ГХМ и имеющих более высокую эффективность, чем существующие. Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых образцов ГХМ и криогенных установок.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на XIV Международном конгрессе по холоду в 1976 году, на совместном научно-техническом семинаре ОМПИ и НПО "Микрокриогенная техника" в 1976 году. Содержание

диссертации докладывалось на семинарах в 1975, 1976 гг. и на заседании кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикация. По материалам диссертации опубликовано 4 работы.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и выводов, содержит 137 страниц машинописного текста, 59 рисунков. Список литературы содержит 104 наименования работ.

В первой главе дан анализ некоторых методов снижения необратимых потерь в криогенных установках, проведен обзор опубликованных работ, рассмотрены особенности цикла идеального прототипа ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях и сформулированы задачи исследования.

Проведенный анализ потерь в охидителях и рефрижераторах показал, что в ряде установок потери относительно велики. Например, в охидителе воздуха на базе ГХМ они составляют более 50% минимальной работы охижения.

Обзор опубликованных работ и предварительные исследования позволили сделать вывод, что одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности криогенных установок является перераспределение части затрат холода с самого низкого на более высокие температурные уровни. Это может быть осуществлено, например, за счет использования газовых холодильных машин со встроенными в промежуточные сечения регенератора теплообменниками или с отбором части рабочего тела из полости расширения.

Сведения о рассматриваемых машинах немногочисленны и содержат, в основном, патентуемые предложения.

Краткий теоретический анализ подобных машин проведен в статьях Г.А.Гороховского. Последние выполнены по результатам исследований, проводимых на кафедре "Криогенная техника" Омского политехнического института.

Опубликованные работы не отвечают на ряд теоретиче-

ских и практических вопросов, связанных с расчетом, анализом рабочего процесса и применением подобных машин.

В связи с этим в работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследование и анализ теоретического и действительного циклов одноступенчатых ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. Поиск оптимальных параметров циклов.
2. Разработка, создание и экспериментальное исследование опытных образцов.
3. Экспериментальная проверка результатов теоретического исследования рабочих процессов ГХМ.
4. Уточнение методов анализа и получение рекомендаций по практическому использованию и проектированию подобных машин.

С целью выяснения термодинамической картины и качественной оценки влияния тепла, подводимого на промежуточных температурных уровнях, рассмотрен изоэнтропно-изобарный цикл (рис. 1). Удельное количество тепла q подводится, например, в виде излучения на одном из промежуточных температурных уровней.

Если теплообменник идеальный и тепло подводится ниже температуры термостатирования T_x (рис. 1а), действительная холодопроизводительность цикла

$$q_o = q_T - q, \quad (1)$$

где $q_T = i_5 - i_4$ — теоретическая холодопроизводительность. В случае идеального газа $i_5 - i_4 = i_3 - i_4$.

Таким образом, при подводе тепла на уровне ниже T_x последнее целиком вычитается из теоретической холодопроизводительности цикла.

Если тепло q подводится к теплообменнику, т.е. на уровне, превышающем T_x , температура начала процесса расширения повысится до T_3 , причем $i_3 - i_3 = q$ (рис. 1б).

Действительная холодопроизводительность составит:

$$q_o' = i_5 - i_4' = (i_5 - i_4) - q \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (2)$$

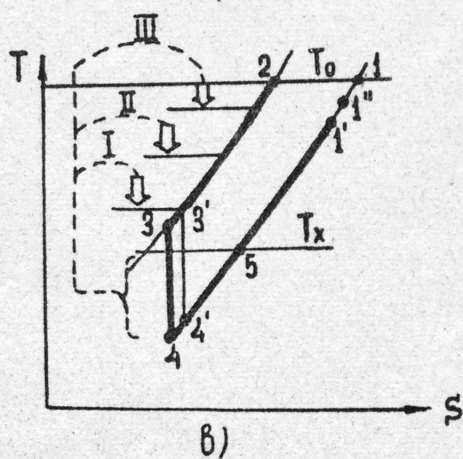
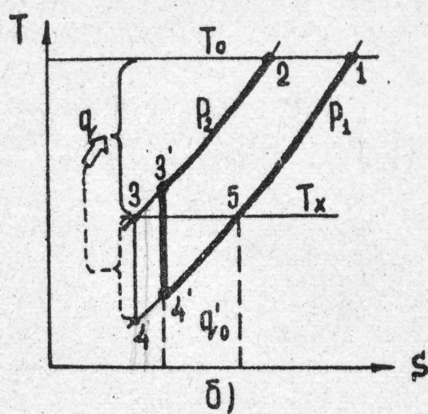
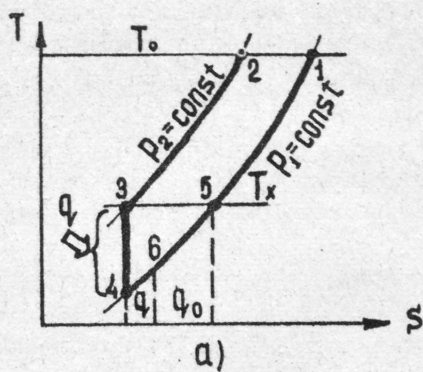


Рис. 1

- где l_4 - новое значение энтальпии газа в конце процесса изэнтропийного расширения;
- P_1, P_2 - давление газа соответственно в конце и начале расширения;
- K - показатель изэнтропы.

Поскольку $\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{K-1}{K}} < 1, q_0' > q_0$,

т.е. влияние q на холодопроизводительность ослабевает. Одновременно уменьшается работа цикла. Оба фактора повышают эффективность цикла по сравнению с первым случаем. Следует отметить, что в случае идеального теплообменника подвод тепла в любое его сечение в интервале от T_x до температуры окружающей среды T_0 приведет к одинаковому эффекту. Перевод части вредных теплопритоков с низкого температурного уровня на более высокий можно осуществлять, например, с помощью теплового экрана, окружающего наиболее холодную часть машины и находящегося в контакте с газом в средней части теплообменника.

Если теплообменник не идеальный (рис. 1в), подвод тепла q на уровне между T_x и T_0 приводит к деформации температурного поля теплообменника. Тогда, кроме двух указанных факторов начинает действовать еще один: уменьшается разность температур на теплом конце теплообменника, уменьшая потери холода с обратным потоком. Причем, влияние q на холодопроизводительность тем слабее, чем ближе место его подвода к теплomu концу теплообменника.

На основе энтропийного метода анализа показано, что при неизменном тепловом потоке q сдвиг места его подвода к теплomu концу теплообменника снижает потери от неидеальности теплообмена. Последнее вытекает из анализа температурного поля теплообменника.

Очевидно, что рассмотренный принцип повышения эффективности может быть распространен на любые криогенные системы.

Рабочие процессы газовых холодильных машин отличаются чрезвычайной сложностью. Однако качественное влияние промежуточного подвода тепла сохраняется таким же, как и

для рассмотренного на рис. 1 изотропно-изобарного цикла. Тепловой поток q , кроме теплопритоков из окружающей среды, может включать в себя тепло, отводимое от различных охлаждаемых устройств при $T > T_x$. Например, при работе одноступенчатой ГХМ на нескольких уровнях термостатирования либо в случае ожижения газа, когда тепло его охлаждения может отводиться в некотором непрерывном интервале температур. Во всех случаях эффективность криогенных установок повышается, если это тепло подводится в цикл на промежуточных температурных уровнях.

Для экспериментального исследования влияния подвода тепла на рабочие процессы действительного цикла были использованы две различные газовые холодильные машины. Первая - микроохладитель на базе ГХМ с упругой перегородкой с тремя теплообменниками. Два из них расположены в промежуточных сечениях регенератора, третий - теплообменник нагрузки, отводящий тепло на минимальном температурном уровне. С помощью такой схемы можно было имитировать условия работы машины в режиме охлаждения и сжижения газа при отводе тепла на трех температурных уровнях, а также имитировать установку теплозащитного экрана, имеющего тепловой контакт с промежуточным сечением регенератора.

Вторая машина - серийная ЗИФ-1000, оснащенная дополнительным теплообменником для предварительного охлаждения сжимаемого газа за счет части холодного гелия, отбираемого из полости расширения. Из дополнительного теплообменника гелий поступал в буферную емкость, где поддерживалось давление, близкое к минимальному в цикле, и далее возвращался в компрессорную полость. В качестве сжимаемого газа использовался осушенный воздух.

Во второй главе проведен теоретический анализ рабочего процесса исследуемых ГХМ. Для теоретического исследования процессов необходимо было составить математическую модель, учитывающую специфику рассматриваемых машин. Для этой цели была использована система одномерных дифференциальных уравнений, характеризующих процессы в полостях и аппаратах ГХМ. Основными допущениями являются: рабочее тело - идеальный газ; отсутствие трения; отсутствие теплообмена газа со стенками цилиндра; отсутствие

теплопритоков из окружающей среды.

С целью более точного определения параметров газа в теплообменных аппаратах, последние разбивались на ряд элементарных участков. Это позволило учесть непостоянство давлений и расходов по длине аппаратов и зависимость теплоемкости материала насадки от температуры.

Для машины с упругой перегородкой, к которой тепло можно было подводить на трех температурных уровнях, были введены выражения для расчета мгновенных значений гидравлического сопротивления аппаратов, определяющих закон движения упругой перегородки.

Для машин с отбором части рабочего тела были использованы выражения для истечения газа, позволившие учесть перераспределение масс между рабочим объемом машины и аппаратами внешнего циркуляционного контура.

Предложенная система уравнений решалась методом конечных разностей с помощью ЭВМ по неявной разностной схеме. В качестве начальных условий принималось произвольное распределение температур и давлений во всех полостях машины. Начальное температурное поле насадки регенератора предполагалось линейным. Особенностью метода явилась возможность уточнения всех необходимых параметров в пределах каждого элементарного шага по времени.

Анализ полученных расчетных зависимостей показал, что подвод тепла в различных сечениях регенератора приводит к деформации температурного поля насадки, определяв которую, можно оценить изменения рабочего процесса ГХМ. Для предварительного анализа целесообразно основные характеристики регенератора определять по осредненным за цикл значениям параметров. На основании ряда дополнительных упрощений были получены аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязь между количеством подводимого тепла и средней за цикл температурой насадки. В частности, при одном источнике тепла в произвольном сечении регенератора

$$T_{np} = \left(1 - \frac{h}{H}\right) T + \frac{h}{H} T_0 + \frac{h(H-h)}{h^2} \frac{Q_{np}}{\delta}, \quad (3)$$

где
$$\gamma = \frac{G_{обр} \cdot C_p}{F} \left(\frac{G_n}{\alpha_n} + \frac{G_{обр}}{\alpha_{обр}} \right) \frac{T_{обр}}{\theta};$$

Q_{np} - тепловой поток, подводимый в сечении регенератора, высотой H на расстоянии h от теплого конца; T_o , T_{np} , T - температуры насадки на холодном конце; в месте подвода тепла и на теплом конце регенератора; G_n , $G_{обр}$ - средний во времени расход газа в период прямого и обратного дутья; α_n , $\alpha_{обр}$ - коэффициенты теплоотдачи в периоды прямого и обратного дутья, соответствующие среднеинтегральным расходам; $T_{обр}$ - время обратного дутья; θ - время цикла; F - поверхность теплообмена.

При двух произвольно расположенных промежуточных источниках тепла

$$T_{np1} = Q_{np1} \cdot \frac{h_2}{H \cdot \gamma} - T_{np2} + \frac{h_2}{h_1} (T - T_{np2}); \quad (4)$$

$$T_{np2} = \frac{Q_{np1} \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right) - Q_{np2} + H \gamma \left[T \left(\frac{h_2 - h_1}{h_1^2} \right) + T_o \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{H} \right) \right]}{H \gamma \left(\frac{2h_1 + h_2}{h_1^2} - \frac{1}{h_2} - \frac{1}{H} \right)} \quad (5)$$

При " n " источниках тепла, разбивающих регенератор на " $n+1$ " участков с одинаковой поверхностью, зависимость между средней температурой насадки и количеством подводимого тепла в каждом сечении имеет вид

$$Q_{npi} = (i+1) \cdot \gamma (T_{npi-1} - 2 T_{npi} + T_{npi+1}); \quad 1 \leq i \leq n. \quad (6)$$

Составив систему из " n " уравнений (6) с " n " неизвестными, можно определить промежуточную температуру в каждом сечении регенератора. В работе показана возможность уточнения этих выражений для случая переменной теплоемкости насадки, переменного расхода газа по длине, конечной длины и мертвого объема теплообменника.

Для машины с отбором гелия были получены зависимости, позволяющие определить среднюю температуру потоков в любом сечении регенератора, а также разность температур на концах регенератора при различных количествах отбираемого газа.

Анализ полученных теоретических зависимостей показал, что с увеличением количества подводимого тепла либо отбираемого рабочего тела, индикаторная холодопроизводительность непрерывно возрастает, так как повышается температурный уровень производимого холода при неизменном минимальном температурном уровне потребителя (часть затрат холода покрывается при промежуточных температурах). Индикаторная мощность при этом изменяется не существенно. Разность температур на теплом конце регенератора уменьшается. Для определения параметров действительного цикла ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях использован метод раздельного определения тепловых потерь, приведенный в работах проф. А.Д.Суслова.

Анализ характеристик действительного цикла показал, что использование ГХМ с дискретным подводом тепла или с отбором части рабочего тела приводит к повышению эффективности охладителя на 20-30% по сравнению с охладителями на базе обычных машин. Использование теплового экрана, охлаждаемого в промежуточном сечении регенератора, повышает эксергетический к.п.д. микроохладителя примерно на 30% за счет снижения потерь от неидеальности теплообмена в аппаратах.

Для более детальной оценки рабочего процесса исследуемых ГХМ был проведен термодинамический анализ необратимых потерь в схемах охладителей воздуха, построенных на базе машин с дискретным отводом тепла и машин с отбором части рабочего тела. Потери эксергии в отдельных процессах определялись на основе известного уравнения Гюи-Стодола. Как показал анализ, наиболее существенное изменение претерпевают потери от неидеальности теплообмена в аппаратах установки. Остальные потери при промежуточном подводе тепла или отборе части рабочего тела изменялись менее чем на 3%.

При отношении суммарного количества тепла, подводимого на промежуточных температурных уровнях, к начальной холодопроизводительности ГХМ только на минимальном уровне, равном 0,8, относительная величина суммарных потерь от неидеальности теплообмена в аппаратах имеет минимальное значение. Дальнейшее увеличение подводимого тепла приводит к снижению эксергетического к.п.д. охладителя из-за роста

12.

потерь от неидеальности теплообмена в регенераторе. Максимальное увеличение эксергетического к.п.д. (на 30%) и минимум потерь в охителе достигается, когда средний расход отбираемого гелия из машины составляет 0,4-0,5% от расхода гелия через теплообменник нагрузки ГХМ.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию ГХМ, целью которого являлась проверка полученных теоретических зависимостей и получение практических рекомендаций для проектирования подобных машин.

В процессе опытного исследования экспериментальных образцов ГХМ решались следующие задачи:

1. Проверка работоспособности созданных вариантов машин, отработка отдельных элементов конструкций.

2. Определение влияния подвода тепла на промежуточных температурных уровнях на рабочий процесс одноступенчатой ГХМ при различных параметрах цикла.

3. Исследование влияния отбора части рабочего тела на характеристики охитителя. Определение оптимальных параметров цикла.

4. Индицирование рабочих полостей по давлению и температуре с целью выявления особенностей протекания отдельных процессов.

Выбор малогабаритной ГХМ с упругой перегородкой для экспериментального образца обусловлен простотой конструкции, удобством в эксплуатации и малым временем выхода на режим (Объем, описываемый компрессорным поршнем, $36,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, отношение объемов сжатия и расширения 4-6). Испытание данной машины проводилось на экспериментальном стенде, оснащенном контрольно-измерительными приборами для замера температур, в том числе по высоте регенератора, давлений, расхода охлаждающей воды, электрической мощности двигателя и нагревателей, разрежения в вакуумном кожухе машины. Индицирование давления в компрессорной полости и перепада давлений между полостями производилось с помощью тензодатчиков. Для их статической и динамической тарировки был создан специальный экспериментальный стенд. Для замера быстроменяющихся температур применялись малоинерционные платиновые термометры сопротивления.

Исследование другой машины - серийной ГХМ ЗИФ-1000 -

позволило не только распространить полученные выводы на другой тип машин и показать возможности повышения эффективности существующих промышленных установок, но и повысить точность и надежность эксперимента. Для испытаний был создан отдельный экспериментальный стенд, обеспечивающий измерение температур, давлений, расходов гелия через дополнительный теплообменник и охлаждающей воды, мощности двигателя. Индицирование полости сжатия осуществлялось с помощью индикатора давления ВНИИХ. Регистрация быстротеменяющихся параметров производилась шлейфовым осциллографом Н-115.

В главе изложена методика и последовательность проведения экспериментов и проведена оценка погрешности измерений.

Четвертая глава посвящена анализу результатов экспериментального исследования ГХМ и сравнению их с теоретическими. Экспериментальное исследование опытных образцов подтвердило выводы теоретического анализа. При оптимальном расходе отбираемого гелия 1 кг/ч , что составляет около $0,4\%$ от расхода гелия через теплообменник нагрузки ГХМ, производительность достигала $12,8 \text{ кг/ч}$ жидкого воздуха, т.е. на 28% выше, чем без отбора рабочего тела. Потребляемая мощность практически не изменялась. Количество охлаждаемого воздуха, найденное расчетным путем, отличалось от замеренного экспериментально не более, чем на 10% . Остальные параметры действительного цикла отличаются от экспериментальных не более, чем на 8% .

Для малогабаритной ГХМ с подводом тепла на трех температурных уровнях была проведена оптимизация по давлению цикла и числу оборотов. Рекомендуемые параметры: минимальное давление цикла $1,6\text{--}1,8 \text{ МПа}$, число оборотов $23\text{--}25 \text{ с}^{-1}$. При данных условиях эксергетический к.п.д. микроохладителя достигал 11% , максимальная холодопроизводительность только на минимальном (80К) уровне 41 Вт .

Опыты подтвердили, что влияние тепла, подводимого в промежуточных сечениях, на индикаторную холодопроизводительность и разность температур на теплом конце регенератора зависит от температурного уровня. Подвод теплового потока 40 Вт на $1/3$ или $2/3$ высоты регенератора (от теп

лого конца) приводит к возрастанию индикаторной холодопроизводительности соответственно на 5 или 12% и уменьшению полезной холодопроизводительности на минимальном температурном уровне на 33 или 90%.

Сравнение результатов теоретического исследования с экспериментальным показало, что площади индикаторных диаграмм различаются менее чем на 7%. Расхождения в значениях полезной холодопроизводительности не превышали 15%.

В главе приведены примеры практического использования и перспективы применения газовых холодильных машин с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях.

ВЫВОДЫ

1. Перевод части подводимого тепла с минимального температурного уровня в промежуточные сечения регенератора позволяет существенно повысить эффективность криогенных систем вследствие сокращения работы цикла и уменьшения потерь холода с обратным потоком.

2. Эффективность криогенных систем может быть существенно повышена, если условия их применения позволяют отводить холод на нескольких температурных уровнях либо в некотором непрерывном интервале температур.

3. Создание ожижителей на базе ГХМ с отбором части рабочего тела для предварительного охлаждения газа позволяет значительно снизить удельный расход энергии и увеличить производительность, например, по воздуху более чем на 26% по сравнению с существующими системами.

4. Создан опытный образец ожижителя воздуха на базе серийной ГХМ. Установка дополнительного теплообменника для предварительного охлаждения охлаждаемого газа за счет части рабочего тела, отбираемого из полости расширения, позволила повысить производительность на 28% и снизить удельные затраты энергии на 0,48 кВт.ч/кг жидкого воздуха по сравнению с существующей схемой. На основании экспериментального исследования разработаны практические рекомендации по проектированию подобных установок.

5. Создан опытный образец микроохладителя на базе ГХМ с упругой перегородкой со встроенными в регенератор промежуточными теплообменниками. Экспериментальное исследование

подтвердило целесообразность установки экранов, охлаждаемых рабочим телом, в промежуточных сечениях регенератора. К.п.д. микроохладителя, работающего на азотном уровне, повышается при этом на 20-30%.

6. Разработан метод определения параметров действительного цикла ГХМ с подводом тепла на промежуточных температурных уровнях. Получены теоретические зависимости, характеризующие особенности рабочего процесса при промежуточном подводе тепла или отборе части рабочего тела из полости расширения одноступенчатых ГХМ. Результаты теоретического исследования удовлетворительно согласуются с экспериментом.

7. Предложены более эффективные схемы воздухоразделительных установок, гелиевых охладителей и рефрижераторов на базе газовых холодильных машин.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Суслов А.Д., Гороховский Г.А., Гунько Ю.И. Исследование одноступенчатой ГХМ, работающей на нескольких температурных уровнях. Сб. "Вопросы криогенной техники", вып. 2, Омский политехнический институт, Омск, 1974.

2. Суслов А.Д., Гороховский Г.А., Гунько Ю.И. Повышение эффективности регенеративных машин для охлаждения газов. Сб. "Химическое и нефтяное машиностроение", № 4, ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, Москва, 1975.

3. Бреусов А.К., Гунько Ю.И., Краморов А.Г., Акиньев Ю.Н. Особенности индицирования ГХМ с упругой перегородкой. Сб. "Вопросы криогенной техники", вып. 3, Омский политехнический институт, Омск, 1975.

4. Gresin A.K., Gorokhovskiy G.A., Bakhnev V.G., Breusov A.K., Gounko Y.I. Gas refrigerating machine with elastic diaphragm. XIV International congress of refrigeration. Moscow. 1975.