

М 380320
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

ПЛАЧЕНДОВСКИЙ Дмитрий Ильич

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ
ТУРБОДЕТАНДЕРОВ

(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

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

- | | |
|-----------------------|--|
| Научный руководитель | - кандидат технических наук,
доцент АРДАШЕВ В.И. |
| Официальные оппоненты | - доктор технических наук,
профессор ФРОЛОВ Е.С.

- кандидат технических наук,
доцент КУЛАКОВ В.М. |
| Ведущее предприятие | - указано в решении специализированного Совета. |

Защита диссертации состоится " 11 " мая 1981 г.
в 16 час. ____ мин. на заседании специализированного Совета
К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, вакуумные
и компрессорные машины и аппараты" МВТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, Лефортовская наб., 1, корпус факультета
"Энергомашиностроения"

С дисс

у.

Авторы

Ваши о
высылать по
лизированны

р, просьба
5, специа-

спец
канди

ЮВ В.Н.

М 380320

Л-86033 с

100 экз.

Типогр

я, 5.



1380320

Плачендовский Д. И. Исследов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

темы. Утвержденные XXVI съездом КПСС "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981 - 1985 годы и на период до 1990 года" предусматривают ускорение научно-технического прогресса в криогенной технике. Ядерные и космические исследования, промышленные линии электропередач и электрические машины на основе сверхпроводимости - далеко неполный перечень потребителей низкотемпературного холода, для которых термодинамическая эффективность и надежность системы криогенного обеспечения имеют решающее значение. Во многих случаях наиболее полно этим требованиям удовлетворяют установки, в которых холод генерируется с помощью детандеров.

Перспективным направлением совершенствования криогенных охлаждающих и жидкостных рефрижераторных установок является применение на последней ступени охлаждения расширительной машины вместо дроссельного вентиля. Режим работы такой машины характеризуется значительной глубиной проникновения процесса расширения в двухфазную область. В криогенной технике для реализации такого процесса пока применяется только поршневой детандер. Причина этого заключается в том, что, выполненные к настоящему времени, исследования работоспособности и эффективности криогенных турбодетандеров затрагивают лишь режимы с небольшой степенью охлаждения рабочего тела, до 7%.

Тенденция роста холодопроизводительности охлаждающих и жидкостных рефрижераторных установок, а также сравнительно невысокая надежность поршневых расширительных машин обуславливают практический интерес к применению турбодетандеров на последней ступени охлаждения этих установок.

Включение турбодетандера вместо дроссельного вентиля изменяет оптимальные параметры цикла установки. Конкретных количественных характеристик, необходимых для проектирования таких систем криогенного обеспечения не существует.

Цели работы сводятся к следующему:

- Исследование работоспособности турбодетандеров в режимах со значительной степенью охлаждения криогенного рабочего тела.
- Выявление специфики работы центробежных турбодетандеров в режимах со значительной степенью охлаждения рабочего тела.
- Оценка влияния конденсации на КПД турбодетандера.

ИВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

- Расчетный анализ показателей и оптимальных параметров циклов криогенных установок с турбодетандером, работающим в двухфазной области.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи:

- Разработана методика расчета распределения влажности, дисперсности и потерь от конденсации по проточной части центростремительного турбодетандера в сверхзвуковых двухфазных режимах со значительной степенью охижения однокомпонентного рабочего тела.

- По этой методике путем вариантных расчетов на ЭЦВМ исследовано влияние режимных параметров и геометрии проточной части машины на размеры частиц жидкой фазы и снижение КПД турбодетандера вследствие неравновесности процесса фазового превращения.

- Для однокомпонентных рабочих тел криогенных установок оценены предельные размеры частиц жидкой фазы еще не оказывающих эрозийного воздействия на проточную часть лопаточной машины.

- Экспериментально оценена структура потока на выходе из центростремительного турбодетандера, работающего в двухфазном режиме, исследованы работоспособность и эффективность нескольких машин в режимах со степенью охижения рабочего тела до 20%.

- Разработан алгоритм и программа для ЭЦВМ по расчету цикла гелиевого рефрижератора с двухфазным турбодетандером и параллельным включением турбодетандеров на промежуточных ступенях охлаждения, с учетом связи КПД турбомашин с режимными параметрами их работы.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

- Впервые разработана математическая модель течения в центростремительном турбодетандере спонтанно конденсирующегося сверхзвукового потока однокомпонентного рабочего тела, позволяющая исследовать на ЭЦВМ сверхзвуковые двухфазные режимы со значительной степенью охижения потока.

- Создана методика профилирования на ЭЦВМ меридионального сечения колеса радиального турбодетандера, учитывающая неравновесность (запаздывание) процесса конденсации рабочего тела.

- Получены новые данные в теоретическом исследовании процесса конденсации в турбодетандере в результате математического моделирования сверхзвуковых двухфазных режимов работы на азоте и гелии.

- Выявлены специфические особенности работы центростремительной машины в двухфазных режимах в результате натурных испытаний при

значительной степени влажности среды.

Достоверность результатов теоретического исследования подтверждается:

- Высокой степенью соответствия результатов расчета по разработанной методике экспериментальным данным. Средний размер частиц жидкой фазы и распределение давления вдоль канала, полученные в моделировании спонтанно конденсирующегося потока водяного пара в сопле Лавала, отличаются лишь на 5% от данных Garmathy &., экспериментально исследовавшего это течение.

- Визуальной оценкой структуры двухфазного потока на выходе из рабочего колеса центробежного турбодетандера, установившей качественное соответствие результатов математического моделирования действительной картине течения.

- Высокой устойчивостью численного метода решения системы дифференциальных уравнений математической модели процесса.

- Достаточно малой величиной погрешности численного моделирования течения в газовой области не превышающей 2% по теплопередачу к моменту достижения рабочим телом состояния сухого насыщенного пара.

Практическая ценность. Доказана возможность применения турбодетандеров в режимах со значительной степенью сжижения криогенных рабочих тел.

- Выявлены специфические требования, которым должна удовлетворять конструкция турбодетандера, предназначенного для работы в двухфазных режимах.

- Разработана методика расчета размеров каналов рабочего колеса радиального турбодетандера (внутреннего и наружного обводов лопаток в меридиональном сечении), с учетом кинетики конденсации рабочего тела.

- Проведен сопоставительный анализ технических показателей циклов гелиевых охладителей с двухфазным турбодетандером и с дроссельным вентилем.

- Для гелиевого рефрижератора с турбодетандером в двухфазной области и турбодетандерами на промежуточных ступенях охлаждения оценена нижняя граница возможной холодопроизводительности установки при оптимальных параметрах цикла, определенных с учетом связи между КПД турбомашин и условиями их работы.

Внедрение. Результаты работы использованы в НПО "КРИОТЕХМАШ" и НПО "ГЕЛИЙМАШ" при разработке систем криогенного обеспечения

с двухфазными турбодетандерами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях:

- Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении", посвященной 150-летию МВТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 1980 г.

- Всесоюзной конференции по холоду, Ташкент, 1977 г.

- Научно-технической конференции факультета "Энергомашиностроение", посвященной XXV съезду КПСС, Москва, 1975 г.

Структура диссертации и объем. Работа состоит из вступления, шести глав, заключения с выводами, списка использованной литературы (95 наименований) и 4-х приложений. Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, иллюстрирована 41 рисунком на 33 страницах и 6-ю таблицами на 2-х страницах. Общий объем работы - 221 страница.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проводится обзор предшествующих работ, рассматривается состояние вопроса, определяются цели, задачи и методы исследований.

По сравнению с поршневыми детандерами работа турбинного расширителя в двухфазной области сопряжена в общем случае с известным риском, так как наличие в потоке жидкой фазы неблагоприятно для лопаточной машины прежде всего из-за опасности эрозии элементов проточной части. Вследствие этого возможно существование предела по допустимой степени влажности потока в проточной части. В мощных конденсационных паровых турбинах этот предел равен 20% (Щегляев А.В.); в центробежных турбодетандерах на природном газе - 25% (Swearingen J.), но может быть поднят до 40%, если обеспечен эффективный вынос из проточной части жидких и твердых частиц, размеры которых превышают 2 мкм (Bergmann D. and Mafi S.).

Известно, что эрозионное воздействие на проточную часть лопаточной машины оказывает только крупнодисперсная влага (имеется ввиду отсутствие в потоке посторонних включений), частицы которой движутся почти независимо от линий тока газообразной фазы. В паровой турбине это капли диаметром (в зависимости от давления) 1 - 8 мкм (Носовицкий А.И. и др.). Практический интерес представляет определение нижней границы размеров капель, которые являются крупнодисперсными в криогенных турбодетандерах, или, что то же самое, - предельных размеров мелкодисперсных капель в этих машинах.

Использовать для этого данные по турбодетандерам, охлаждающим природный газ, не представляется возможным как по причине неполноты сведений, так и вследствие того, что неизвестный "вклад" в эрозию этих машин вносят твердые частицы, проходящие через фильтры установок. В отличие от этого, проблеме эрозии конденсационных паровых турбин посвящено значительное количество экспериментальных и расчетно-теоретических работ. Кроме того, по таким важным факторам как однокомпонентность и чистота рабочего тела паровая турбина идентична криогенному турбодетандеру. Расчет показал, что вследствие меньшей разницы между плотностями жидкой ρ' и газообразной ρ'' фаз в низкотемпературной машине, предельный размер мелкодисперсных капель в ней при давлении 0,13 МПа составляет $d_m \approx 12$ мкм при расширении азота, ~ 60 - водорода и ~ 300 - гелия.

В отличие от паровой турбины в двухфазных режимах работы, охлаждение природного газа в турбодетандере не сопровождается заметным снижением КПД машины, поскольку рабочее тело, являющееся смесью газов, конденсируется практически без переохлаждения. Причина заключается в том, что процесс образования новой фазы имеет в этом случае принципиально отличный характер - гетерогенная конденсация.

Разработке методик расчета параметров спонтанно конденсирующегося потока в проточной части турборасширительных машин посвящено значительное число работ (Страхович К.И. и Ожигов Г.Е., Кириллов И.И. и Яблоник Р.М., Качуринер Ю.Я., Bakhtan F., Campbell B., Moore M., Garmany B. и др.). Каждая из этих методик имеет свои недостатки и достоинства, как в смысле более полного учета отдельных факторов процесса, так и погрешностей, обусловленных методом решения, но ни одна из них не позволяет с достаточной достоверностью рассчитать сверхзвуковые двухфазные режимы работы турбодетандеров со степенью влажности рабочего тела значительно превышающей 10%. Причины этого следующие.

Методики не полностью учитывают влияние влаговыделения на изменение значений газодинамических параметров из-за условия постоянства параметров жидкой фазы, распространяемого на разностные уравнения.

В математических моделях не учитываются объем занимаемой жидкой фазой и изменение ее плотности в процессе расширения, что можно считать допустимым лишь при небольших степенях влажности.

На основании проведенного анализа были поставлены следующие

задачи исследования:

- Разработка методики расчета распределения влажности, дисперсности и потерь от конденсации по проточной части центробежного турбодетандера в сверхзвуковых двухфазных режимах со значительной степенью охлаждения однокомпонентного рабочего тела.

- Определение предельно допустимой из условия работоспособности или эффективности криогенного турбодетандера степени влажности рабочего тела в проточной части.

- Анализ основных параметров цикла криогенных установок с двухфазным турбодетандером.

Для решения этих задач применялись как расчетно-теоретический, так и экспериментальный методы исследования.

Во второй главе приведена разработка математической модели сверхзвукового процесса расширения со спонтанной конденсацией однокомпонентного рабочего тела в центробежном турбодетандере полностью учитывающей влияние фазового превращения на изменение значений газодинамических параметров, с учетом объема занимаемого жидкой фазой и изменения ее плотности в процессе расширения.

Разработка методов расчета неравновесных двухфазных течений в общем случае весьма сложная задача, так как в потоке пара образуются жидкие частицы различных размеров, которые обмениваются с ним кинетической и тепловой энергией и могут переходить из одного агрегатного состояния в другое. В связи с этим создание общего метода численного исследования таких течений в решетках с учетом всех перечисленных эффектов является очень сложной задачей. Более того, такой путь вряд ли можно считать рациональным, так как в решаемой задаче некоторыми факторами без заметного ущерба точности можно пренебречь. Поскольку нет необходимости в расчете течения с крупнодисперсной жидкой фазой (турбодетандер не работоспособен), математическая модель построена для односкоростного движения, так как при мелкодисперсной жидкости практически нет скольжения между фазами. Последнее обстоятельство позволяет пренебречь коагуляцией частиц.

В математической модели принято одномерное осредненное движение. Это допустимо благодаря некоторым особенностям турбодетандеров, к которым относятся ускоренное движение рабочего тела по межлопаточным каналам и сравнительно малые размеры лопаток (по сравнению с диаметром) в плоскостях, перпендикулярных осредненным поверхностям тока.

В главе рассмотрены термодинамические, кинетические аспекты фазовых превращений, расчетная модель влажного пара, уравнения энергии, технической работы, неразрывности и зависимости по расчету термодинамических свойств расширяемой среды.

Перечисленные уравнения, разрешенные относительно искомых величин, образуют следующую систему:

$$\frac{dr_k}{dx} = \begin{cases} \frac{c_p g''}{V_L g'_k} \sqrt{\frac{ZRT}{2\pi}} \cdot \frac{T'_k - T}{1 - \frac{2\sigma}{r_k g'_k L}} & , \text{ если } r_k < \infty \\ \frac{\lambda''}{V r_k g'_k L} (T'_k - T), & \text{ если } r_k > \infty \end{cases}$$

$$\frac{dg_k}{dx} = \begin{cases} -\frac{g_k}{dx}, & \text{ если } (r+dr)_k < r_{kp} \\ \frac{g_k}{r_k^3 g'_k} (3r_k^2 g'_k \frac{dr_k}{dx} + r_k^3 \frac{dg'_k}{dx}), & \text{ если } (r+dr)_k > r_{kp} \end{cases}$$

$$\frac{di'_{rk}}{dx} = -\frac{3}{r_k g'_k} (\sigma_k - T'_k \frac{d\sigma}{dT}) \left(\frac{1}{r_k} \frac{dr_k}{dx} + \frac{1}{g'_k} \frac{dg'_k}{dx} + T'_k \frac{d^2\sigma}{dT^2} \cdot \frac{dT'_k}{dx} \right);$$

$$\frac{dg}{dx} = \sum_{k=1}^n \frac{dg_k}{dx};$$

$$\frac{dg'}{dx} = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^n (g'_k \frac{dg_k}{dx} + g_k \frac{dg'_k}{dx}) - \frac{1}{g^2} \frac{dg}{dx};$$

(I)

$$\frac{di'}{dx} = -\frac{1}{g^2} \frac{dg}{dx} \sum_{k=1}^n g_k (i'_{\infty} + i'_r)_k +$$

$$+ \frac{1}{g} \sum_{k=1}^n \left[(i'_{\infty} + i'_r)_k \frac{dg_k}{dx} + g_k \left(\frac{di'_{\infty}}{dx} + \frac{di'_r}{dx} \right)_k \right];$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{E_1 \left[E_3 + g(1-g) \left(\frac{g}{g'} \right)^2 \frac{dS'}{dx} \right] + \left[E_4 g \left(1 - \frac{g}{g'} \right) + i'' - i' \right] \frac{dg}{dx} + g \frac{di'}{dx}}{\frac{\eta_s}{g} - (1-g) \left\{ \frac{\frac{1}{P} \left(\frac{\partial i''}{\partial T} \right) g''}{\frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right) g''} + \eta_r E_2 \left[\left(\frac{\partial i''}{\partial T} \right) g'' - \frac{\left(\frac{\partial i''}{\partial g''} \right)_T}{E_0 G_0} \right] \right\}};$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{E_0}{E_1} \left[E_4 \frac{dp}{dx} + (i'' - i') \frac{dg}{dx} - g \frac{di'}{dx} \right];$$

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{\eta_r}{Vg} \cdot \frac{dp}{dx} + C_3;$$

$$\frac{dg}{dx} = -g \left(\frac{1}{V} \frac{dV}{dx} + \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right),$$

где V - скорость потока: при расчете течения в направляющем аппарате $V = C$ и $C_3 = 0$, в колесе $V = W$ и $C_3 = (u/W) / (du/dx)$; η_s , η_r - изэнтропийный и гидравлический КПД соответствующего элемента проточной части турбодетандера; χ - криволинейная координата пути потока в проточной части; r - радиус капли; k - номер группы капель; i_∞ , i'_r - энтальпия жидкости при плоской границе раздела фаз и энтальпия, обусловленная капиллярной энергией; g - массовая степень влажности потока; G_0 , E_0 , E_1 , E_2 , E_3 , E_4 - комплексы коэффициентов, состоящие из геометрических и термодинамических параметров.

Приведенная система уравнений является системой неявного типа, поскольку производные, входящие в числитель правой части уравнения расчета dp/dx являются функциями его левой части. Поэтому решение системы (I) производится численным методом на ЭЦМ. Сформулированы начальные и граничные условия. Приведен метод "прохождения" седловой особой точки при расчете сверхзвуковых режимов.

Третья глава посвящена разработке алгоритма математического моделирования до- и сверхзвуковых двухфазных режимов работы центробежного турбодетандера. Рассмотрены прямой и обратный методы расчета течения в проточной части. В прямом методе все па-

параметры потока являются функциями формы сопловых и межлопаточных каналов. Приведены уравнения связи текущей площади проходного сечения каналов направляющего аппарата и рабочего колеса (для относительного движения) с координатой пути потока в этих элементах проточной части турбодетандера - $F = F(x)$. В обратном методе, задав, например, закон изменения давления $p = p(x)$, получаем в результате численного моделирования помимо искомых параметров потока и контуры каналов проточной части.

Недостатком прямого метода является необходимость проведения повторных расчетов с изменением давления перед рабочим колесом p_1 , чтобы получить в численном моделировании требуемую степень понижения давления в турбодетандере. В сверхзвуковых режимах при варьировании p_1 изменяется угол отклонения потока в косом срезе. В результате появляется угол атаки на входе в колесо, что сложно учесть в расчетной модели.

В отличие от прямого, обратный метод численного моделирования гарантирует получение в конце расчета требуемого давления рабочего тела при заданной степени реактивности турбодетандера. Для расчета обратным методом уравнение из системы (I), имеющее в левой части dp/dx разрешается относительно dF/dx (входит в комплекс E_3). Все другие уравнения системы (I) остаются без изменения.

Приведены методы профилирования на ЭЦВМ меридионального сечения колеса (построение внутреннего и наружного обводов лопаток) по закону $F = F(x)$, получаемому при математическом моделировании до- и сверхзвуковых двухфазных режимов работы радиальных турбодетандеров обратным методом.

Рассмотрен метод численного интегрирования системы (I) - "погноз-коррекция" на основе разностной схемы первого порядка.

Приведена и пояснена укрупненная блок-схема алгоритма математического моделирования прямым и обратным методами до- и сверхзвуковых двухфазных режимов работы центробежных турбодетандеров. Даны сведения о программе для ЭЦВМ, реализующей на языке ФОРТРАН-IV этот алгоритм: количество перфокарт 1200 (расчет на гелии), занимаемая память 75 кбайтов, время счета на ЕС-1022 при 600-ых шагах интегрирования около 1 часа. Распечатка программы приведена в приложении.

Четвертая глава посвящена оценке достоверности расчетов по разработанной методике и исследованию сверхзвуковых двухфазных

режимов работы турбодетандеров на азоте и на гелии методом вычислительного эксперимента.

Для оценки достоверности разработанной методики использованы экспериментальные данные, приведенные в работе Garmathy G., исследовавшего с помощью лазера спонтанно конденсирующийся поток водяного пара в сопле Лавала. На рис. 1 показано изменение статического давления вдоль канала сопла, полученное в опыте и в численном моделировании этого режима по разработанной методике при разной величине шага интегрирования Δx . На рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные данные по среднему радиусу частиц жидкой фазы вдоль канала сопла.

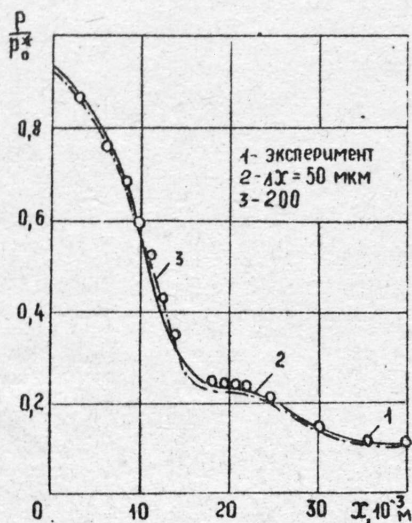


Рис. 1. Изменение статического давления в сопле

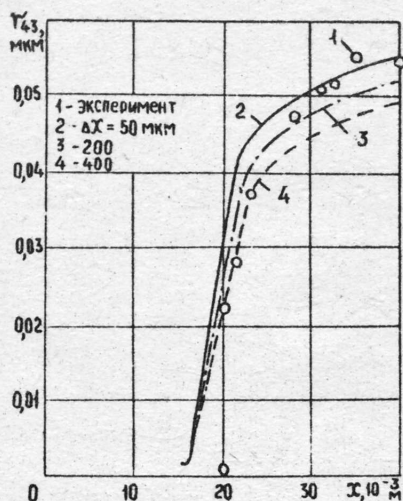


Рис. 2. Изменение среднего радиуса капель в сопле

Из рис. 1 и 2 видно, что результаты расчета находятся в хорошем соответствии с опытными данными – расхождение менее 5%. Величина шага интегрирования не оказывает сильного влияния на точность вычислительного эксперимента, что свидетельствует о высокой устойчивости метода численного интегрирования.

Для определения основных закономерностей двухфазных сверхзвуковых режимов работы турбодетандеров и оценки влияния различных факторов на размеры частиц жидкой фазы и снижение КПД

машины вследствие переохлаждения среды, математический эксперимент проведен с разными рабочими телами (азот и гелий) при варьировании в широком диапазоне граничных (параметры режима) и начальных (геометрия проточной части) условий. Степень влажности рабочего тела достигала в расчетах 34%, размеры проточной части машины изменялись в 10 раз (наружный диаметр колеса $d_1 = 20$ и $200 \cdot 10^{-3}$ м). Все режимы сверхзвуковые. Степень реактивности турбодетандера задавалась в пределах 0,42–0,58. Давление на выходе из рабочего колеса во всех режимах 0,13 МПа.

На рис. 3 и 4 приведены некоторые результаты численного моделирования двухфазного режима работы турбодетандера на гелии ($p_0 = 0,80$ МПа, $T_0 = 8,29$ К, $\eta_s = 1$, $\eta_r = 1$, $d_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ м).

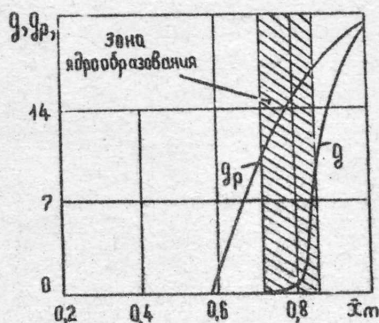


Рис. 3. Изменение влажности в колесе в реальном g и равновесном g_p процессах расширения

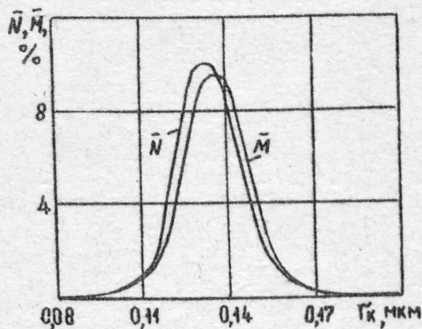


Рис. 4. Массовый $\tilde{M}$ и количественный $\tilde{N}$ спектры размеров капель гелия на выходе из колеса

На рис. 3 параметр $\bar{x}_m$ является относительной координатой пути потока по средней линии канала в меридиональной плоскости колеса. Из рис. 3 видно, что, несмотря на существенное запаздывание конденсации, степень влажности потока к моменту выхода из колеса успевает достичь практически равновесного значения. Из рис. 4 следует, что жидкая фаза на выходе из колеса имеет мелкодисперсную, сравнительно однородную структуру. Больше всего содержится капель с размерами 0,12–0,13 мкм. Процентное содержание частиц, имеющих меньшие и большие размеры, существенно ниже. Радиус наиболее крупных капель не превышает 0,21 мкм, следовательно, конденсация не влияет на работоспособность машины.

Снижение КПД турбодетандера, обусловленное неравновесностью фазового превращения, незначительно в рассматриваемом режиме, всего 0,65%, что является следствием малого переохлаждения, достигающего только 0,11 градуса.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию двухфазных режимов работы криогенных турбодетандеров со значительной степенью охлаждения потока, проведенному с целью оценки структуры влажнопаровой среды на выходе из проточной части и определения влияния конденсации на работоспособность и КПД машины.

Работоспособность турбодетандеров в двухфазных режимах определялась по характеру работы машины и по результатам последующего осмотра проточной части.

Исследование влияния фазового превращения на КПД турбодетандера проводилось путем сравнения рабочих характеристик машины в, так называемых, газовых "холодных" (процесс расширения заканчивается не доходя на несколько градусов до состояния сухого насыщенного пара) и в двухфазных режимах. По снижению КПД турбодетандера в результате перехода с первого на второй режим, при том же начальном давлении и приведенной окружной скорости, оценивались потери, обусловленные конденсацией рабочего тела.

Экспериментальное исследование выполнено на пяти машинах ($d_1 = 28$ и $12 \cdot 10^{-3}$ м), каждая из которых представляет собой центростремительную ступень с радиально-осевым полуоткрытым рабочим колесом. Тормозом служит бездиффузорный центробежный нагнетатель, установленный на одном валу с турбиной. Подшипники газостатические.

Испытания турбодетандеров проведены на специальном стенде, имеющем в линии сжатого газа рекуперативный теплообменник, обратным потоком которого является поток из турбодетандера. После машины установлен электроподогреватель, служащий для определения ре КПД в двухфазных режимах путем испарения жидкой фазы (по значениям расхода через турбодетандер и мощности электроподогревателя рассчитывалась энтальпия влажного пара). Стенд снабжен электроподогревателем, включенным в линию сжатого газа между теплообменником и машиной для уменьшения инерционности регулирования температуры на входе в турбодетандер, что особенно важно в испытаниях, когда входные параметры близки к условиям сухого насыщенного пара. Стенд оснащен комплектом контрольно-измери-

тельной аппаратуры для замера температуры, давления, расхода через турбодетандер, частоты вращения ротора машины и мощности электроподогревателя.

Приведена конструкция электроподогревателя, созданного с учетом специфики экспериментального исследования двухфазных режимов работы турбодетандера.

С доверительной вероятностью 68,3% относительная ошибка в определении КПД машин в исследованных двухфазных режимах не превосходит $\pm 6,7\%$, степени влажности $\pm 2,9\%$. Расчет погрешности экспериментальных данных приведен в приложении.

Обработка результатов измерений производилась на ЭЦВМ ЕС-1022 по специально разработанной программе (~700 перфокарт).

Для оценки структуры двухфазного потока на выходе из колеса был разработан, изготовлен и смонтирован сменный корпус турбодетандера специальной конструкции, позволяющий вести визуальное наблюдение течения на длине $150 \cdot 10^{-3}$ м, начиная почти от выходного среза рабочего колеса.

Визуальными наблюдениями установлено, что жидкая фаза возникает в проточной части машины, о чем свидетельствовала высокая оптическая плотность потока. Пленочного течения по стенкам не было. Эти данные косвенно подтвердили результаты расчетно — теоретических исследований.

Экспериментами установлено, что относительная ширина сопла направляющего аппарата $\bar{\delta} = \delta_c / \delta_{\text{ном}}$ значительно сильнее влияет на КПД турбодетандера в двухфазных режимах работы, чем в газовых. Причина этого заключается в том, что при $\bar{\delta} < 1$ в колесе имеет место, так называемая, "застойная" зона, не заполненная потоком.

Таблица результатов испытаний турбодетандеров в двухфазных и газовых "холодных" режимах приведена в приложении. Наибольшая степень охлаждения рабочего тела (воздуха) в машине достигала 20%. При этом не отмечено нарушения работоспособности турбодетандера. Все машины работали в двухфазных режимах устойчиво, с одной характерной особенностью — колебаниями статического давления на входе и выходе из колеса турбодетандера. Амплитуда этих колебаний ($\sim 0,01$ МПа) и частота сравнительно невелики.

Шестая глава посвящена исследованию криогенных циклов с двухфазными турбодетандерами.

Наибольший практический интерес представляет анализ циклов тепловых установок, поскольку случаи применения азота как основ-

ного хладагента в циклах с расширительными машинами довольно редки и определяются, как правило, специальными требованиями.

Проведен сопоставительный анализ цикла гелиевой охладительной установки имеющей двухфазный турбодетандер с дроссельными циклами по таким техническим показателям как удельный расход энергии и условная удельная теплопередающая поверхность теплообменников охладителя

$$F_{yc} = \frac{1}{\chi} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\Delta t_i} = \frac{1}{\chi} \sum_{i=1}^n F_i k_i, \quad (2)$$

где n — количество теплообменников в цикле; Q_i — тепловая нагрузка теплообменника; Δt_i — среднелогарифмический температурный напор; F_i — теплопередающая поверхность; k_i — коэффициент теплопередачи; χ — коэффициент охладения цикла.

Если принять коэффициенты k_i одинаковыми во всех аппаратах, то F_{yc} можно рассматривать как характеристику компактности установки.

Сравнение выполнено для трех схем циклов: цикл с промежуточным охлаждением жидким азотом с турбодетандером на всем перепаде давления, с дросселем; цикл, отличающийся от предыдущего лишь тем, что вместо дросселя применен двухфазный турбодетандер; цикл с промежуточным охлаждением жидким азотом, двумя турбодетандерами, включенными параллельно и дросселем.

В результате расчетного анализа количественно оценен выигрыш в экономичности и компактности установки, даваемый применением двухфазного турбодетандера взамен дросселя. Степень охладения в этом турбодетандере q не превышает 22%.

Выполнена оптимизация режимных параметров цикла гелиевого рефрижератора с двухфазным турбодетандером и турбодетандерами на промежуточных ступенях охлаждения, включенными параллельно, с учетом взаимосвязи между КПД турбомашин и режимными параметрами их работы. Вариантные расчеты цикла велись на ЭВМ ЕС-1022. Для этого был разработан алгоритм и составлена программа (~800 перфокарт), распечатка которой приведена в приложении. Длительность расчета одного режима работы рефрижератора составляет 30 с.

Оценена величина нижней границы возможной холодопроизводительности такой установки. Существование этой границы обусловлено наличием Практических пределов в миниатюризации турбомашин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В исследованных методом математического эксперимента

сверхзвуковых двухфазных режимах работы центростремительного турбодетандера степень ожигения достигала 34% при расширении азота и 21%-гелия. Установлено, что при всех возможных комбинациях параметров режима и геометрии проточной части диаметр частиц жидкой фазы на выходе из колеса не превышает 1,5 мкм, что много меньше допустимых размеров.

2. Численным моделированием установлено, что в исследованном диапазоне двухфазных режимов неравновесность процесса конденсации приводит к снижению КПД турбодетандера не более, чем на 2-3%. В режимах с большей степенью ожигения, при равном давлении на выходе, меньше запаздывание процесса конденсации и более однородная структура потока (выше мелкодисперсность жидкой фазы).

3. Расчеты двухфазных сверхзвуковых режимов показали, что при достаточно большой части теплоперепада срабатываемой в газовой области до правой пограничной кривой процесс конденсации не получает заметного развития в пределах проточной части и поток на выходе из колеса практически не содержит жидкой фазы.

4. Сравнение расчетных данных по двухфазным режимам работы турбодетандера на гелии и на азоте показывает, что, при одинаковой степени ожигения и прочих равных условиях, конденсация гелия протекает более равновесно, что обуславливает значительно меньшее ее влияние на геометрию профилируемой проточной части. Структура жидкой фазы гелия на выходе из колеса более крупнодисперсная, чем у азота.

5. В тех режимах работы турбодетандера, в которых линия процесса расширения в ST-диаграмме проходит левее критической точки, математический эксперимент показал практически мгновенное 100%-ное ожигение потока при достижении в расчете изобары критического давления рабочего тела.

6. Испытания нескольких центростремительных малорасходных турбодетандеров на воздухе в режимах с образованием жидкой фазы до 20% по массе, подтвердил косвенно основные выводы теоретического исследования, показали, что при ширине сопл направляющего аппарата отличающейся от номинальной (примерно равной ширине лопаток колеса на входе), КПД турбодетандера в двухфазных режимах может снижаться значительно больше, чем в газовых. Этот разрыв по КПД тем значительнее, чем выше содержание жидкой фазы в потоке на входе в колесо и чем больше ширина сопл отличается от

номинального значения.

7. Анализ циклов гелиевых ожижительных установок показал, что постановка расширительной машины вместо дросселя повышает экономичность ожижителя на $\sim 40\%$ и снижает требуемую теплопередающую поверхность теплообменников на единицу жидкого продукта $F_{\text{тс}}$ в $\sim 2,1$ раза. При включении в цикл с дросселем дополнительной ступени охлаждения (детандера, работающего на всем перепаде давления), экономичность возрастает до уровня цикла с двухфазной расширительной машиной, имеющего на одну ступень охлаждения меньше, но показатель $F_{\text{тс}}$ у последнего цикла в $\sim 1,5$ раза ниже.

8. Для гелиевого рефрижератора, построенного по схеме с двухфазным турбодетандером и турбодетандерами на промежуточных ступенях охлаждения, произведена оценка минимально возможной холодопроизводительности. Эта величина равна ~ 100 Вт при температуре охлаждения 4,5 К. В такой установке оптимальное давление прямого потока составляет 0,8-1,0 МПа.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Плачендовский Д.И., Ардашев В.И. Исследование двухфазных центростремительных турбодетандеров. — В кн.: Тезисы докладов научно-технической конференции факультета "Энергомашиностроение", посвященной 150-летию МЭИУ им.Н.Э.Баумана, М., 1980, с.7.

2. Ардашев В.И., Плачендовский Д.И., Жолшараев А. Исследование влажнопаровых турбодетандеров. — В кн.: Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха: Тез. докл. Всесоюз. конф. по холоду, Ташкент, 1977, с.16-17.

3. Ардашев В.И., Жолшараев А., Плачендовский Д.И. Методика расчета параметров двухфазного потока в турбодетандере. — В кн.: Глубокий холод и кондиционирование. Труды МЭТУ, 1979, № 296, с.57-61.

4. Ардашев В.И., Микулин Е.И., Плачендовский Д.И., Жолшараев А. Исследование криогенных циклов с влажнопаровыми расширительными машинками. — Известия ВУЗов. Машиностроение, 1977. № 3, с.87-92.

По результатам работы получено два авторских свидетельства: № 561105. — В.И., 1977, № 21 и № 620864. — В.И., 1978, № 31.