

М443129

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ОРЛОВ
Александр Васильевич

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИЕВОГО ПОРШНЕВОГО
БЕСКЛАПАННОГО ДЕТАНДЕРА С 6-ФАЗНЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ

Специальность 05.04.03 - машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем
кондиционирования

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1986

УДК 621.59

Работа выполнена в Институте теоретической и экспериментальной физики

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Микулин Е.И.

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор

Пластинин П.И.

кандидат технических наук, ст.н.с.

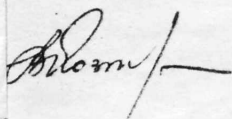
Буткевич И.К.

НПО "Гелиймаш"

1986 г. на заседании специ-
.07 в Московском высшем техни-
, г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

ся в библиотеке Московского
м. Н.Э.Баумана

прис 1986г.

 В.Н.КОЗЛОВ

М44320

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Применение криогенной техники является в настоящее время одним из важнейших направлений технического прогресса в различных отраслях народного хозяйства. Расширение масштабов использования криогенных установок предъявляет все возрастающие требования к их эффективности и качеству. В этой связи решающее значение приобретает проблема совершенствования расширительных машин-детандеров, нашедших широкое применение в ожижительных и рефрижераторных установках.

За последнее время предложены и разработаны различные новые типы гелиевых поршневых детандеров, однако, задача их дальнейшего совершенствования по-прежнему остается актуальной. Это связано, во-первых, с тем, что эффективность этих машин, особенно на малых расходах газа, еще далека от своего теоретического предела и, во-вторых, перспектива повышения надежности криогенных установок во многом зависит от решения проблемы создания технологичных конструкций поршневых детандеров, обладающих высокой надежностью.

Значительный прогресс в решении этой задачи может быть достигнут за счет применения бесклапанного механизма газораспределения, позволяющего создавать эффективные расширительные машины с повышенной надежностью и долговечностью.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – создание эффективной, надежной и технологичной конструкции гелиевого поршневого детандера на основе нового 6-фазного бесклапанного механизма газораспределения (ББД).

Для реализации этой цели были поставлены следующие конкретные задачи:

- разработка теоретических основ расчета системы газораспределения детандера ББД;
- расчет оптимальных параметров рабочего цикла детандера ББД;
- создание экспериментального детандера ББД и исследование его в широком диапазоне температур и давлений гелия, включая двухфазную область состояния гелия;
- разработка рекомендаций по расчету детандеров данного типа.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В работе впервые сформулированы принципы

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1443129

Орлов А.В. Создание и иссле

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

расчета 6-фазной бесклапанной системы газораспределения и получены уравнения, выражающие связь между кинематическими параметрами механизма привода детандера и параметрами его рабочего цикла.

На основе полученных зависимостей рассчитаны на ЭВМ характеристики для определения основных конструктивных размеров детандера. Создана поршневая расширительная машина нового типа - 6БД, предназначенная для работы в области гелиевых температур. Проведено экспериментальное исследование и получены характеристики гелиевого поршневого детандера с 6-фазным бесклапанным механизмом газораспределения. Экспериментально доказана возможность повышения эффективности бесклапанных детандеров, надежно работающих в диапазоне гелиевых температур, в том числе и в двухфазной области состояния гелия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. В работе даны рекомендации по выбору оптимальных параметров и проведению конструктивного расчета детандера типа 6БД. Разработана номограмма для расчета кинематики детандера. Определены области его применения в криогенных установках. Работа проводилась в рамках научно-исследовательской программы по разработке системы криогенного обеспечения установки СФИКС (гос.регистр. № У19627). В результате данной работы создана машина для гелиевого рефрижератора небольшой мощности РГ-100/20, предназначенного для охлаждения источника ультрахолодных нейтронов.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты работы докладывались на I Всесоюзной научно-технической конференции по криогенной технике (Москва, 1973), У Международной конференции по криогенной технике (Япония, 1974), Всесоюзной научно-технической конференции по холоду (Ташкент, 1977) и Всесоюзном семинаре "Научно-технические проблемы криогенной техники и кондиционирования" в МВТУ им. Баумана (Москва, 1982).

По теме диссертации опубликовано пять печатных работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Она изложена на 107 страницах основного текста, содержит 38 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает в себя 84 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ проведен анализ литературных данных по вопросу использования поршневых детандеров и тенденций развития их конструкций. Показаны преимущества и недостатки различных типов расширительных машин, дано их сравнение по эффективности рабочего цикла.

Среди криогенных поршневых детандеров наибольшее распространение получили машины с клапанным механизмом газораспределения. Этот механизм обеспечивает высокую эффективность рабочего цикла и, соответственно, высокие значения адиабатного к.п.д., составляющего в современных конструкциях в среднем $70 + 80\%$. Однако, относительно невысокая надежность сложного клапанного механизма газораспределения является его существенным недостатком. Установлено, что более чем в 50% случаев отказ в работе детандера происходит по причине неисправностей в клапанном механизме газораспределения.

Значительное повышение надежности поршневых детандеров достигается за счет применения бесклапанной системы газораспределения, которая позволяет создавать расширительные машины, чрезвычайно простые по конструкции. Однако, по эффективности они уступают клапанным машинам вследствие того, что их 4-фазный рабочий цикл термодинамически менее выгоден, нежели 6-фазный цикл, характерный для клапанных машин. В последнее время предложен ряд конструкций бесклапанных детандеров, в которых удается осуществить 6-фазный рабочий цикл и тем самым существенно повысить их эффективность.

Проведенный анализ существующих и предлагаемых конструкций поршневых бесклапанных детандеров показал необходимость дальнейших разработок ввиду того, что к настоящему времени реализована лишь небольшая часть технических предложений, касающихся в основном машин с 4-фазным рабочим циклом. В главе обоснована необходимость разработки поршневого бесклапанного детандера с 6-фазным рабочим циклом (6БД).

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена разработке теоретических основ расчета системы газораспределения детандера 6БД. На рис. I дана схема детандера 6БД, особенностью которого является то, что его поршень и цилиндр совершают смещенные по фазе возвратно-поступательные движения. Газораспределение осуществляется через окна,

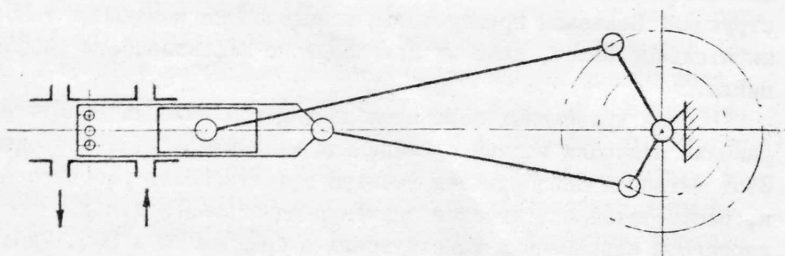


Рис. 1. Кинематическая схема детандера 6ВД

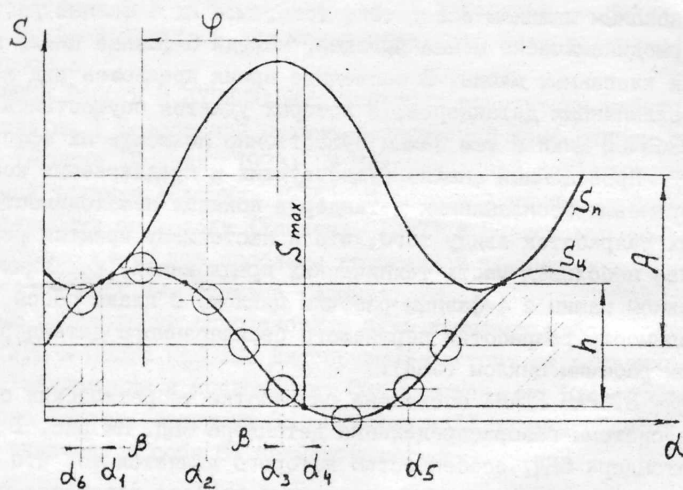


Рис. 2. Диаграмма движения поршня и цилиндра

расположенные в нижней части цилиндра и перекрываемые неподвижным уплотнительным кольцом.

Для реализации цикла газораспределения в детандере БДД необходимо, чтобы поршень и цилиндр двигались по определенному закону, причем желательно прерывистое движение цилиндра, аналогичное движению клапанов. В этом случае процессы наполнения и выталкивания идут при полностью открытых окнах и гидравлические потери минимальны. Однако, с точки зрения простоты механизма привода целесообразно пойти на некоторое увеличение гидравлических потерь и заменить прерывистое движение цилиндра гармоническим, смещенным по фазе с движением поршня. Привод поршня и цилиндра в этом случае можно осуществить с помощью простого кривошипно-шатунного механизма. Параметры этого механизма - угол развала кривошипов ψ , а также радиусы кривошипов поршня R_n и цилиндра R_c - должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить необходимые фазы рабочего цикла.

Для определения величин фаз газораспределения необходимо найти их зависимости от кинематических параметров. На рис. 2 дана развернутая по углу поворота коленчатого вала детандера диаграмма движения поршня и цилиндра, из которой видно, что закон относительного гармонического движения поршня и цилиндра выражается следующим уравнением:

$$S = A + R_n \cdot \sin(\alpha - \psi) - R_c \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где A - расстояние между центрами колебаний поршня и цилиндра.

Путем дифференцирования уравнения (1) находятся точки наибольшего сближения и расхождения поршня и цилиндра (1 и 4), значения угла α в других точках диаграммы и величины фазовых углов:

наполнения и выталкивания

$$\alpha_n = \alpha_b = \pi - \alpha \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon - \cos \psi}{\sin \psi} + 2\beta, \quad (2)$$

расширения и обратного сжатия

$$\alpha_p = \alpha_c = 2\alpha \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon - \cos \psi}{\sin \psi} - 2\beta,$$

где β - угол опережения впуска и выпуска; $\varepsilon = R_c^{(3)} / R_n$.

Максимально возможная при данных кинематических параметрах величина газораспределительного окна определяется из выражения:

$$d_o = 2 R_u \left(1 - \frac{\varepsilon - \cos \varphi}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cdot \cos \varphi}} \right) \quad (4)$$

Значение угла опережения β при этом будет равно:

$$\beta = \arcsin \frac{\varepsilon - \cos \varphi}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \varphi}} - \arcsin \left[\frac{2(\varepsilon - \cos \varphi)}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \varphi}} - 1 \right]. \quad (5)$$

Величина рабочего хода в детандере ББД меньше суммы ходов поршня и цилиндра и определяется из выражения:

$$S = \chi (S_n + S_u), \quad (6)$$

где χ - коэффициент хода, вычисляемый по уравнению:

$$\chi = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon - 2\varepsilon \cos \varphi}}{1 + \varepsilon}. \quad (7)$$

Параметры рабочего цикла детандера - отсечка наполнения C_o и отсечка выталкивания ℓ_o - также однозначно определяются кинематическими величинами:

$$C_o = \frac{[\varepsilon \cdot \sin \beta/2 + \sin(\varphi - \beta/2)]^2}{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cdot \cos \varphi}, \quad (8)$$

$$\ell_o = \frac{[\varepsilon \cdot \cos \beta/2 - \cos(\varphi - \beta/2)]^2}{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \varphi}. \quad (9)$$

Если сложить правые и левые части этих двух уравнений, то получается характерная для детандера ББД связь между параметрами его рабочего цикла:

$$C_o + \ell_o = 1. \quad (10)$$

В результате этой связи невозможна оптимизация рабочего цикла по каждому из этих параметров в отдельности.

На основании полученных уравнений была составлена номограмма (рис. 3) для приближенного расчета механизма газораспределения детандера ББД. Анализ этих уравнений показал, что данный механизм газораспределения обеспечивает выбор параметров рабочего цикла в широком диапазоне их значений.

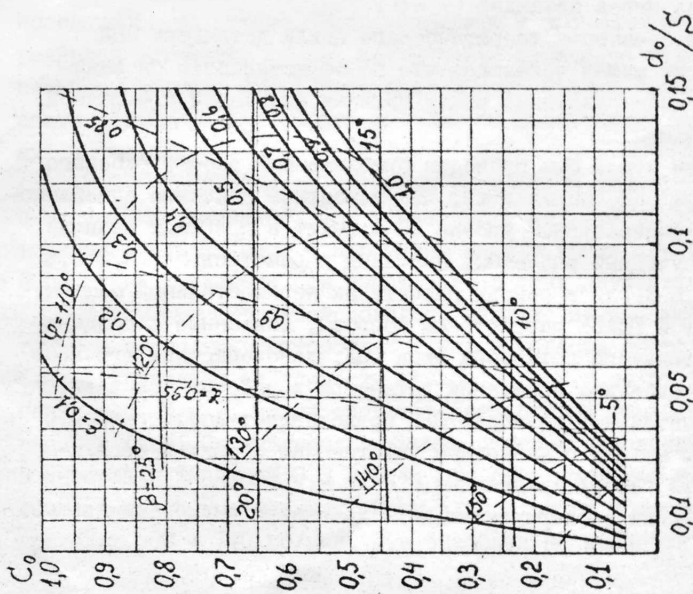
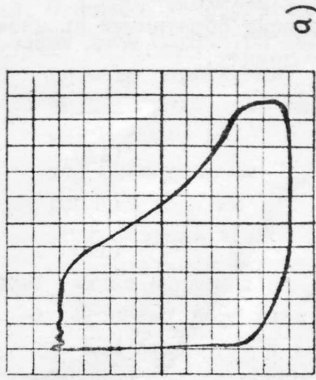
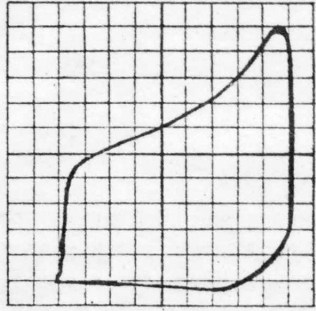


Рис. 3. Номограмма для расчета механизма газораспределения детандера ОБД



а)



б)

Рис. 4. Индикаторные диаграммы при работе детандера в газовой (а) и двухфазной (б) областях состояния гелия

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ проведен анализ рабочего цикла детандера 6БД. На первом этапе рассматривалась возможность осуществления в данной машине идеального цикла с термодинамически обратимыми процессами. Такой цикл возможен при следующих условиях:

$$C_o = (C_o)_{\min} = \frac{1 + \alpha_c}{\sigma^{1/k}} - \alpha_c, \quad (11)$$

$$b_o = (b_o)_{\max} = \alpha_c (\sigma^{1/k} - 1). \quad (12)$$

Для детандера 6БД необходимо принять во внимание также выражение (10). В результате решения системы этих трех равенств делается вывод о невозможности осуществления в детандере 6БД идеального цикла расширения газа и, как следствие этого, недостижимости предельного термодинамического к.п.д., равного единице при $C_o \neq 0$.

На втором этапе анализировался теоретический цикл с адиабатными процессами. В результате было получено, что оптимальная величина мертвого пространства в детандере 6БД равна $(\alpha_c)_{\min}$, а адиабатный к.п.д. растёт с уменьшением отсечки наполнения и в предельном случае при $C_o = 0$, адиабатный к.п.д. равен единице, но расхода газа через детандер $G = 0$.

Расчетное сравнение теоретического цикла детандера 6БД с циклами других машин показало, что по эффективности он занимает промежуточное положение между циклами клапанной и 4-фазной бесклапанной машин.

На третьем этапе был проведен приближенный расчет рабочего цикла детандера 6БД, показавший, что вероятное значение адиабатного к.п.д. на температурном уровне 20 К лежит в пределах величин $0,6 + 0,7$. Полученные расчетные значения параметров $C_o = 0,2 + 0,4$ и $b_o = 0,6 + 0,8$ легли в основу расчета экспериментальной машины.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ рассмотрены вопросы, связанные с созданием экспериментального детандера типа 6БД, дано описание его конструкции и стендов для испытания детандера в рабочих условиях.

Экспериментальный детандер 6БД представляет собой гелиевую расширительную машину с манжетным уплотнением поршня и бесклапанной системой газораспределения.

При испытании экспериментального детандера в двухфазной

области состояния гелия в его конструкцию был внесен ряд изменений. Основные конструктивные параметры детандера следующие (в скобках даны параметры парожидкостного детандера 6БД):

диаметр поршня, мм	- 31,8
диаметр цилиндра, мм	- 32
ход поршня, мм	- 21
ход цилиндра, мм	- 12
рабочий ход, мм	- 30 (28)
угол развала кривошипов, град	- 130 (115)
относительный мертвый объем, %	- 15 (17)
число оборотов, об/мин	- 175 + 920 (320)
число газораспределительных окон	- 16
диаметр газораспределительного окна, мм	- 1,2 (1,5)

Испытание экспериментального детандера в газовой области состояния гелия проводилось на стенде, представляющем собой гелиевый рефрижератор с азотным охлаждением и испытываемым детандером. На стенде замерялись температура и давление гелия перед детандером и после него расход газа через машину, утечки и перетечки гелия через уплотнение, велось индифицирование рабочего цикла по давлению.

Испытание детандера в двухфазной области состояния гелия проводилось на стенде, присоединенном к промышленной водородно-гелиевой установке ВГО-1. Подключение детандера параллельно дроссельному вентилю ВГО-1 дало возможность прямой оценки эффективности детандера при работе его вместо дросселя на нижней ступени охладителя.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ даны основные результаты экспериментального исследования детандера 6БД в газовой и двухфазной областях состояния гелия. На рис. 4 приведены индикаторные диаграммы рабочего цикла детандера при работе его в этих двух режимах.

В эксперименте исследовалось влияние на эффективность детандера различных факторов. В газовой области состояния гелия были исследованы зависимости адиабатного к.п.д. от величины отсечки наполнения, числа оборотов детандера и параметров расширяемого газа. Оптимальная величина отсечки наполнения получена в интервале значений $0,3 + 0,4$; что соответствует диапазону отсечек в клапанных машинах. Оптимальное число оборотов лежало в пределах $580 + 740$ об/мин. Эти значения не являются предельными

для данной конструкции, за счет увеличения размера и числа газораспределительных окон быстроходность детандера 6БД может быть увеличена до $1500 + 2000$ об/мин. Исследование влияния параметров расширяемого газа показало, что адиабатный к.п.д. возрастает при понижении температуры и росте давления газа на входе в машину. Зависимость адиабатного к.п.д. от давления за детандером имеет оптимум при $0,2 + 0,25$ МН/м². Максимальное значение адиабатного к.п.д., полученное в эксперименте при работе детандера в газовой области состояния гелия, составило 78%.

В двухфазной области состояния гелия детандер был испытан в двух режимах работы – в режиме ожижения гелия и рефрижераторном режиме. Характеристики обоих режимов приведены в таблице.

П а р а м е т р ы	Р е ж и м ожижения	Рефрижерат. режим
1. Давление на входе, МН/м ²	2,5	2,5
2. Температуры на входе, К	8,3	6,4
3. Число оборотов в минуту	320	320
4. Отсечка наполнения	0,6	0,6
5. Расход гелия, кг/ч	40,0	38,5
6. Кол.ожижаемого гелия, кг/ч	9,6	18,7
7. Коэффициент ожижения	0,24	0,49
8. Адиабатный к.п.д.	0,64	0,38

Было замерено изменение производительности ожижителя ВГО-I при переходе с дроссельного вентиля на работу с детандером. Производительность ожижителя при работе с дроссельным вентилем составила по скорости накопления жидкого гелия в сборнике 45 л/ч и увеличивалась до 77 л/ч при переходе на работу с детандером. При использовании детандера, ожижитель мог работать и без откачки водородной ванны, в этом случае его производительность была более 40 л/ч .

В двухфазной области состояния гелия получены зависимости адиабатного к.п.д. детандера от отсечки наполнения и давления газа на входе детандера. Оптимальная величина отсечки наполнения в парожидкостном детандере 6БД дежит в пределах $0,7 + 0,75$, что значительно выше диапазона ее оптимальных значений в газовой области состояния гелия. Существенная величина изотермичес-

кого дроссель-эффекта в околокритической области состояния гелия предопределила оптимум адиабатного к.п.д. при давлении газа на входе детандера в пределах $2,5 + 2,7 \text{ МН/м}^2$.

В ШЕСТОЙ ГЛАВЕ изложена методика расчета детандера типа 6БД и даны рекомендации по его применению.

В результате теоретического и экспериментального исследования детандера 6БД можно рекомендовать следующие данные для его расчета:

- отсечка наполнения $C_0 = 0,3 + 0,4$ (для парожидкостного детандера $C_0 = 0,7 + 0,75$);
- отсечка выталкивания $b_0 = 0,6 + 0,7$ (для парожидкостного детандера $b_0 = 0,25 + 0,3$);
- относительное мертвое пространство $\alpha_0 = 0,15 + 0,2$;
- число оборотов детандера $N = 500 + 1000 \text{ об/мин}$;
- относительный размер газораспределительного окна $d_0/S = 0,05 + 0,1$.

Экспериментально полученные характеристики показывают, что оптимальными условиями работы детандера типа 6БД в газовой области состояния гелия являются температурный уровень ниже 30 К и давление газа на входе в детандер $2,5 + 3,0 \text{ МН/м}^2$. В области двухфазного состояния гелия парожидкостной детандер 6БД работает с хорошей эффективностью при коэффициенте ожижения до 20% . Исходя из оптимальных условий работы, рекомендованы области преимущественного применения детандера 6БД в криогенных ожижительных и рефрижераторных установках.

В качестве примера практического использования детандера 6БД может служить криогенная установка для охлаждения конвертора ультрахолодных нейтронов, созданная в Институте теоретической и экспериментальной физики. Установка рассчитана на холодопроизводительность порядка $80 + 100 \text{ Вт}$ на температурном уровне $20 + 30 \text{ К}$. Особенностью установки является не только использование бесклапанного детандера типа 6БД, но и криогенного компрессора, работающего при температуре 80 К . Применение этих двух криогенных машин позволило создать компактную и надежную рефрижераторную установку.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан и исследован новый тип поршневой бесклапанной машины — детандер с 6-фазным рабочим циклом, отличающийся повышенной эффективностью, а также высокой надежностью и технологичностью конструкции.

2. Проведено теоретическое исследование системы газораспределения этой машины, получены аналитические зависимости, выражающие связь между кинематическими параметрами механизма привода детандера и параметрами его рабочего цикла. Рассчитана на ЭВМ и предложена номограмма для определения кинематических параметров и фаз газораспределения в этом детандере. Показано, что данная система газораспределения обеспечивает выбор параметров рабочего цикла в широком диапазоне их значений.

3. Выявлена особенность рабочего цикла детандера 6БД, заключающаяся в жесткой связи между его основными параметрами — отсечками наполнения и выталкивания. Проведен анализ теоретического цикла и показано, что по эффективности рабочий цикл детандера 6БД занимает промежуточное положение между циклами клапанной и 4-фазной бесклапанной машин.

4. Создан опытный образец бесклапанной машины типа 6БД и проведено ее экспериментальное исследование в широком диапазоне температур и давлений гелия. Получены зависимости адиабатного к.п.д. от давления и температуры газа, отсечек наполнения и числа оборотов детандера. Проведено индцирование рабочего цикла по давлению и подтверждена возможность осуществления в данной машине рабочего цикла, аналогичного циклу клапанной машины.

Экспериментально установлена возможность работы машин данного типа в двухфазной области состояния гелия. Определены оптимальные режимы работы детандера в этих условиях.

5. Определены особенности конструктивного расчета детандера 6БД. Предложена последовательность его проведения и даны рекомендации по выбору параметров машины. Рассмотрены области преимущественного применения детандера 6БД в криогенной технике.

6. Результаты проведенной работы нашли практическое применение. Создана 6-фазная бесклапанная машина небольшой мощности, эффективно работающая в составе гелиевой рефрижераторной установки с криокомпрессором.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. В.М.Добров, А.В.Орлов. Исследование поршневых бесклапанных детандеров в области температур $40 + 10$ К. Тезисы I Всесоюзной научнс-технической конференции по криогенной технике. Москва, 1973.

2. А.В.Белоногов, В.М.Добров, А.В.Орлов, Ю.И.Поваров. Поршневые детандеры для криогенных установок. В сб. ЦИТИХИМНЕФТЕМАШ "Криогенное и кислородное машиностроение" № 2, 1974.

3. V.M.Dobrov, A.V.Orlov. The valveless piston expansion engine with 6-phase gas distribution cycle. Int.cryog.eng.conference. Kyoto, Japan, 1974.

4. А.В.Орлов. Исследование работы бесклапанного детандера в области влажного пара гелия. Тезисы Всесоюзной конференции по холоду. Ташкент, 1977.

5. А.В.Орлов, В.М.Добров. Исследование работы бесклапанного детандера в газовой области и в области влажного пара гелия. -Химическое и нефтяное машиностроение, № 9, 1980.



Подписано к печати 28.03.86	Л62795	Печ.л. 1,0
Формат 60x90 1/16	Тираж 100 экз.	Заказ 317

Отпечатано в ИТЭР, 117259, Москва, Б.Черемушкинская, 25