

На правах рукописи



004601840

АРСЕНЬЕВ ИВАН АНДРЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
И КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЕТАНДЕРНЫХ СТУПЕНЕЙ
С ПОРШНЕМ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

13 МАЙ 2010

Санкт - Петербург
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий".

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Прилуцкий Игорь Кирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Носков Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Рыжиков Леонид Никитович

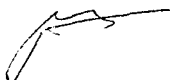
Ведущее предприятие: ОАО «КОМПРЕССОР»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «19» августа 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.234.01 в Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий по адресу: 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9, тел./факс (812) 315-30-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУНиПТ.

Автореферат разослан «15» августа 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.234.01,
доктор технических наук, профессор



В.А. Рыков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание прогрессивных конструкций поршневых детандеров (ПД) с улучшенными, теоретически обоснованными и подтвержденными натурным экспериментом технико-экономическими показателями неразрывно связано с разработкой более совершенных методов расчета. Они должны основываться на комплексном описании сущности протекающих в ступени детандера физических процессов и учете их взаимосвязи с конструктивными параметрами элементов ступени, режимом её работы и свойствами реального рабочего вещества. Прикладная программа расчета, создаваемая на базе математической модели, должна быть проста при использовании и обеспечивать достоверную информацию о текущих и интегральных параметрах ступени детандера в объёме достаточном для обоснования оптимального (из ряда возможных) варианта объекта исследования на стадии проектирования.

Поршневые детандеры до настоящего времени широко применяются в криогенной технике и являются одним из основных технологических агрегатов, определяющих эффективность и надёжность работы криогенных установок малой производительности.

Анализируя современные тенденции, можно отметить все более широкое использование установок, утилизирующих энергию сжатого природного газа на газораспределительных станциях (ГРС) магистральных газопроводов и выполняющих функции газового двигателя – источника механической энергии, так называемые детандер-генераторные агрегаты (ДГА). Наряду с выработкой электроэнергии использование ДГА позволяет создавать холодильные установки и системы кондиционирования путем использования теплоты низкотемпературного уровня. Важным преимуществом ДГА в составе ГРС является возможность получения сжиженного природного газа (СПГ). Для повышения производительности детандерных ступеней ДГА и снижения их удельных массогабаритных показателей они должны проектироваться на освоенных в производстве многорядных высокооборотных компрессорных базах крейскопфного типа. В конструкции детандерных ступеней следует предусматривать поршни двойного действия и элементы, обеспечивающие работоспособность агрегата на режимах отличных от номинального для обеспечения стабилизации работы агрегата в широком диапазоне рабочих параметров.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета и оптимального проектирования детандерных ступеней с поршнем двойного действия. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Развитие математической модели (ММ) рабочих процессов применительно к ступени воздушных и газовых поршневых детандеров с поршнями двойного действия, работающей по вновь предложенному циклу и укомплектованной модернизированной системой газораспределения.
2. Расширение объёма итоговой информации, получаемой в цифровой и графической форме при выполнении численного эксперимента.
3. Разработка конструкции впускного клапана с толкателем в седле, обеспе-

чивающего сохранение работоспособности ступени детандера в условиях эксплуатации в широком диапазоне режимных параметров.

4. Постановка и проведение натурного эксперимента с целью подтверждения адекватности используемой при расчетном анализе математической модели.
5. Выполнение численного эксперимента с целью изучения интенсивности процессов теплообмена и массопереноса, протекающих в рабочих полостях ступени и в межкольцевых объемах разделяющего их уплотнительного узла.
6. Обоснование оптимальных геометрических параметров элементов системы газораспределения передней и задней полостей ступени при работе детандера на номинальном режиме.
7. Численный анализ возможных способов изменения производительности детандера и прогнозирование его работы на нерасчетных режимах.
8. Оценка возникающих в элементах ступени деформаций и напряжений с целью обоснования работоспособности детандера с позиций прочности.
9. Обобщение результатов расчетного анализа и разработка рекомендаций по проектированию ступени детандера с поршнем двойного действия.
10. Внедрение предложенных методик расчетного анализа и оптимального проектирования на предприятиях соответствующего профиля и в учебный процесс специализированных кафедр ВУЗов.

Научная новизна работы заключается в комплексном рассмотрении протекающих в ступени детандера рабочих процессов, базирующемся на совокупности традиционных индикаторных и температурных диаграмм в сочетании с представлением рабочих циклов в координатах $T-s$ и $h-M$ и подробной информацией по интегральным параметрам в цифровой и графической форме. Это позволило расширить наши представления об интенсивности процессов теплообмена и переноса массы на любом участке рабочего цикла ступени с одно- и двухклапанным газораспределением.

Практические результаты.

1. Изготовлен и испытан в составе детандерной ступени модернизированный сферический клапан, укомплектованный толкателем в седле. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными подтверждает адекватность изменений, внесенных в математическую модель, и указывает на целесообразность применения модернизированного впускного клапана.
2. Предложена методика оптимального проектирования ступеней детандеров с поршнем двойного действия. В частности, рекомендуется:
 - выбор максимально возможного диаметра цилиндра, соответствующего номинальному усилию принятой при проектировании стандартной базы;
 - использование впускных клапанов со встроенными толкателями, обеспечивающими стабильную работу детандера на режимах, отличающихся от номинального (расчетного);
 - использование методики оптимального проектирования ступени детандера с поршнем двойного действия при конструктивно одинаковых клапанах в передней и задней полостях ступени. Суть методики сводится к поиску и обоснованию такого сочетания геометрических параметров элементов ступени,

при которых обеспечивается идентичность рабочих циклов в передней и задней полостях ступени и равенство конечных температур газа на выходе обеих полостей. Для этого, в качестве рационального технического решения, предлагается увеличивать предварительный натяг пружины клапанов, устанавливаемых в передней полости ступени, за счет установки под пружины сменных регулировочных шайб заданной толщины;

- выполнение радиальных разгрузочных каналов на торцах уплотнительных колец, оптимальное число и геометрические размеры которых обеспечивают примерное равенство средних перепадов давлений на кольцах и их равномерный износ во времени.

3. Предложен способ изменения производительности высокооборотных детандеров с двухклапанным газораспределением, при котором конечная температура газа на выходе детандера остается примерно постоянной.

4. На основе метода конечных элементов проанализировано напряженно-деформированное состояние наиболее ответственных узлов ступени детандера - самодействующих клапанов различного типа, имеющих сложные геометрические формы; показана целесообразность его применения на заключительной стадии проектирования детандера.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных трудах, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и доложены в 2004-2009 годах на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов и студентов СПбГУ-НиИТ.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (98 наименований) и 2-х приложений. Она изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 28 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первые работы по созданию поршневых расширительных машин независимо друг от друга были выполнены Пикте (1905 г.), Гейлацдом (Германия) и Плясом (США). Вопросами исследования машин объемного действия в разное время занимались Архаров А.М., Бродянский В.М., Бумагин Г.И., Захарепко В.П., Кузнецов Л.Г., Носков А.И., Пластинин П.И., Прилуцкий И.К., Фотин Б.С., Хрусталева Б.С., Юша В.Л. и др.

Выполненный обзор литературы позволил автору установить следующее:

- наиболее перспективным направлением применения поршневых детандеров является создание детандер-генераторных агрегатов на отработанных в условиях эксплуатации высокооборотных компрессорных базах крейцкопфного типа. В этом случае появляется возможность использования ступеней с поршнями двойного действия, что способствует не только повышению производительности детандеров, но и резкому снижению их удельных массогабаритных показателей. Вместе с тем, возникает задача, связанная с анализом особенностей работы детандеров подобного типа.

- в ранее выполненных работах, посвященных поршневым детандерам с самодействующими клапанами, рассматривались рабочие циклы, соответствующие только номинальному режиму работы детандера, что не гарантировало работоспособность детандера при изменении свойств рабочего вещества, а также входных и выходных параметров газа. Следовательно, возникает необходимость создания такой системы газораспределения, которая обеспечивала бы сохранение работоспособности детандера в широком диапазоне свойств и параметров рабочего вещества.

- для повышения эффективности разрабатываемых детандерных ступеней с поршнем двойного действия требуется дальнейшее развитие методов их расчетного анализа, позволяющих на стадии проектирования иметь подробную итоговую информацию о текущих и интегральных параметрах ступени и проникать в сущность протекающих физических процессов, а также обеспечивать надежный прогноз широкого комплекса технико-экономических показателей разрабатываемого детандера.

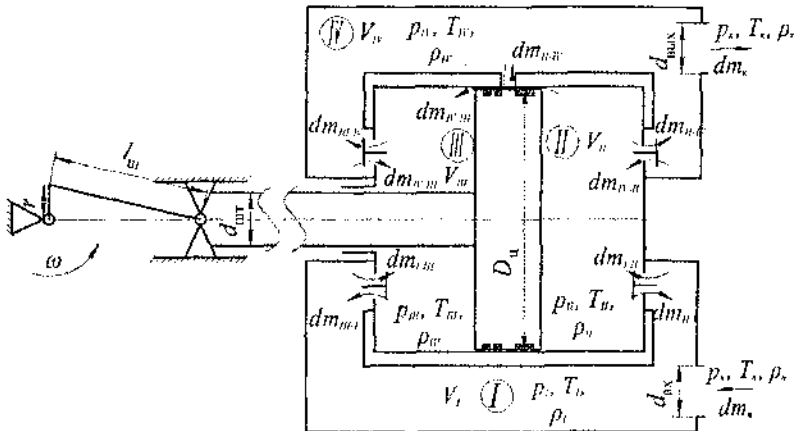


Рис. 1. Формализация объекта исследования

I — Впускная полость; II — Рабочая камеры полости А;
III — Рабочая камеры полости Б; IV — Выпускная полость

Основу метода расчетного анализа, представленного в настоящей работе, составляет уточненная математическая модель (ММ), которая позволяет выполнять численный анализ работы детандерной ступени (см. рис. 1) с поршнем двойного действия с учетом следующих факторов:

- детандерная ступень работает по комбинированному рабочему циклу (см. рис. 2), реализацию которого обеспечивает конструкция впускного клапана (см. рис. 3), оснащенного толкателем и обеспечивающая работоспособность детандерной ступени при любых соотношениях начального и конечного давления и величинах относительного мертвого пространства;

- на текущие и интегральные параметры работы детандерной ступени оказывает влияние объемы присоединенных к камере полостей и диаметры патрубков входной и выходной полостей;

поршня при критическом режиме истечения

$$M = (\mu F)_{\phi} \sqrt{k \cdot p_{BX} \cdot \rho_{BX} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (4)$$

или в случае докритического истечения

$$M = (\mu F)_{\phi} \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \rho_{BX} \cdot p_{BX} \left[\left(\frac{p_{ВЫХ}}{p_{BX}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{ВЫХ}}{p_{BX}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5)$$

Для определения количества теплоты используется уравнение конвективного теплообмена

$$\Delta Q_{\Delta \varphi} = 1/\omega \cdot [\alpha_{F,\varphi} \cdot F_{\varphi} \cdot T_{cr} - T_{r,\varphi}] \cdot \Delta \varphi, \quad (6)$$

где текущая теплообменная поверхность рабочей камеры

$$F_{\varphi} = 2 \cdot \pi/4 \cdot D - d_{шт} \cdot D + d_{шт} + \pi [S_{м,л} + S_{\varphi} \cdot D + S_{м,л} + S_{\varphi} \cdot d_{шт}]; \quad (7)$$

осредненный по поверхности рабочей камеры мгновенный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{F,\varphi} = \left[\frac{\lambda}{D_{экв}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_H}} \cdot \left(\frac{\rho \cdot w \cdot D_{экв}}{\mu} \right)^{0.6} \right]_{\varphi} \quad (8)$$

Для определения свойств рабочих агентов используется уравнение состояния реальных газов $pV = zRT$, в котором коэффициент сжимаемости определяется по уравнению, предложенному Ли и Кесслером

$$z = z^{(o)} + \omega/\omega^r \cdot z^r - z^{(o)r} \quad (9)$$

Для расчета термодинамических свойств используется метод, основанный на том, что интересующие свойства определяются как сумма соответствующих значений в идеальном газе состоянии и величины их изотермического изменения.

Для определения текущего сечения в щели клапанов необходимо определить текущую высоту подъема клапанных пластин, для чего используется уравнение движения пластины массой m

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = F_{газ} + F_{упр}, \quad (10)$$

где газодинамическая сила, стремящаяся закрыть клапан

$$F_{газ} = \Delta p f_{кл} \rho \delta; \quad (11)$$

сила упругости пружины

$$F_{упр} = z_{пр} c_{пр} \cdot [h_{0,i} + h_{кл,i} - h_{\varphi,i} + h_{\varphi}^*]. \quad (12)$$

В отличие от ранее изложенных методик, в данной работе предлагается модифицированное уравнение силы упругости пружины, учитывающее наличие толкателя (см. рис. 3), т.е. определенную величину h_{φ}^* - величину текущего перемещения толкателя.

В программу расчета заложены логические условия периодов действия

толкателя, т.е. взаимного положения поршня с толкателем.

Скорость перемещения пластин с массой m находим по уравнению

$$w_{\varphi+\Delta\varphi} = w_{\varphi} \pm \frac{\Delta\varphi}{m\omega} F_{заг} + F_{упр}, \quad (13)$$

откуда перемещение пластины

$$h_{\varphi+\Delta\varphi} = h_{\varphi} \pm \frac{\Delta\varphi}{\omega} w_{\varphi+\Delta\varphi}. \quad (14)$$

Для расчета текущего сечения выхлопных окон (см. рис. 4):

- определяется момент начала открытия окон S_3

$$S_3 = L_{oc.A} - \frac{h_{np} + z_p - 1 \cdot t_p}{2} \quad \text{и} \quad S_3 = S_n - \left(L_{oc.B} + \frac{h_{np} + z_p - 1 \cdot t_p}{2} \right) \quad (15)$$

и момент полного открытия окон S_3 :

$$S_3 = L_{oc.A} + \frac{h_{np} + z_p - 1 \cdot t_p}{2} \quad \text{и} \quad S_3 = S_n - \left(L_{oc.B} - \frac{h_{np} + z_p - 1 \cdot t_p}{2} \right) \quad (16)$$

для прямой и обратной полостей;

- определяется площадь выхлопных окон с учетом их многорядного исполнения

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } S_{\varphi} \leq S_3 \quad F_{o,\varphi} = 0; \\ S_{\varphi} \leq S_3 + z_{p,1} \cdot t_p \quad F_{o,\varphi} = |S_3 + z_{p,1} \cdot t_p - S_{\varphi}| \cdot \pi \cdot D_{\eta}; \\ S_{\varphi} \geq S_3 \quad F_{o,\varphi} = h_{np} \cdot D_{\eta} \cdot \pi \cdot z_{\sigma} \cdot z_p. \end{array} \right\} \quad (17)$$

Кольцевая проточка

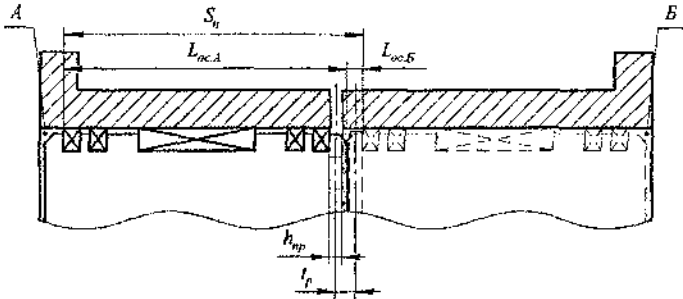


Рис. 2. Схема расположения выхлопных окон цилиндра детандерной ступени с поршнем двойного действия.

При моделировании рабочих процессов в межкольцевых объемах уплотнительного узла детандерной ступени с поршнем двойного действия учтены следующие специфические особенности:

1. Дискретное изменение числа рабочих (нагруженных) уплотнительных элементов в функции от угла поворота коленчатого вала.
2. Дополнительная утечка газа из межкольцевых объемов в выпускную камеру.

3. Одновременное совершение рабочих циклов в полостях А и Б и сдвинутых друг относительно друга на 180° .

Расчет параметров газа в уплотнительных узлах основывается на тех же уравнениях, что и расчет параметров газа в рабочей камере детандера, поскольку объем, заключенный между соседними поршневыми кольцами, рассматривается в модели аналогично рабочей камере детандера.

Программа расчета, в которой реализована математическая модель, предусматривает расширенный объем выходной информации. В частности, на печать в цифровой и графической форме выводятся:

- текущие значения объема рабочей камеры, давления, температуры, энтальпии, энтропии, плотности и массы газа в ней;
- перемещение и скорости перемещения каждой из пластин впускных и выпускных клапанов;
- комплекс показателей, характеризующих теплообмен и процесс переноса массы в рабочей камере и в межкольцевых объемах уплотнительных узлов.

На основе полученных текущих параметров формируется комплекс интегральных показателей, дающий достаточно полное представление о работе детандера.

Для подтверждения адекватности ММ на лабораторном стенде кафедры криогенной техники СПбГУНиПТ была испытана детандерная ступень с модернизированным впускным клапаном со встроенным толкателем. В ходе эксперимента исследовалась работа ступени с одно- и двухклапанной системами газораспределения при перемещенном мертвом пространстве. Экспериментальные индикаторные диаграммы были обработаны, перестроены и совмещены с расчетными индикаторными диаграммами. Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

1. Процесс наполнения на помпальном режиме работы ступени заканчивается практически при одном и том же угле поворота вала.

2. Изменение параметров газа в процессах расширения, выхлопа и выталкивания практически идентично.

3. Окончанию расчетного процесса обратного сжатия соответствует меньший (\approx на 20°) угол поворота вала, что при допущении о герметичности рабочей камеры при расчетах представляется вполне логичным.

4. Процессы «выпуск-нагнетание» (работа толкателя) качественно идентичны и незначительно отличаются в количественном отношении.

Таким образом, можно сделать вывод об адекватности ММ в целом.

Целью выполненного в работе численного эксперимента является выявление специфических особенностей газодинамических и тепловых процессов, а также процессов переноса массы в рабочих камерах детандерной ступени с поршнем двойного действия и получение рекомендаций, способствующих улучшению её технико-экономических показателей. При выполнении численного эксперимента использована прикладная программа расчета, реализованная в настоящей работе.

В ходе численного анализа был апробирован ряд новых методик.

В том числе:

- Оптимизация геометрических параметров впускных и выпускных клапанов передней А и задней Б полостей детандерной ступени с поршнем двойного действия, целью которой являлось обеспечение идентичности рабочих циклов и интегральных параметров обеих полостей ступени;
- Анализ динамики потоков газа в уплотнении **дискового** поршня с учетом сдвига по фазе рабочих циклов в полостях А и Б на угол 180° .
- Поиск и обоснование оптимального числа и геометрических размеров разгрузочных каналов на торцах уплотнительных колец с целью обеспечения равномерного распределения давления по кольцам и увеличения продолжительности их работы до плановой замены в процессе эксплуатации.
- Оценка интенсивности процессов теплообмена в ступенях поршневых детандеров с различной частотой вращения вала, температурой стенок рабочей камеры, степенью негерметичности впускных клапанов и др.
- Обоснование оптимального объема и диаметра патрубков входной и выходной полостей ступени с целью минимизации газодинамических потерь и снижения удельных массогабаритных показателей детандера.
- Дифференцированная оценка интенсивности процесса теплообмена на различных участках рабочего цикла.

На основе анализа результатов выполненного численного эксперимента было **установлено** следующее:

1. В цилиндре детандерной ступени с поршнем двойного действия наличие штока предопределяет неравенство активных площадей поршня F^* и рабочих объемов V_h в передней (А) и задней (Б) полостях. В случае их комплектации идентичными органами газораспределения, возникает заметная разница в величинах относительных мертвых пространств по полостям, в скоростях течения газа через открытые клапаны, в условиях теплообмена газа с поверхностями рабочих камер и т.д., что в конечном итоге приводит к существенным различиям в отдельных процессах и рабочих циклах в полостях А и Б в целом, а также в интегральных показателях детандера. Для достижения идентичных рабочих циклов и одинаковых конечных температур газа в полостях А и Б требуется сокращение продолжительности процесса наполнения в полости Б, что достигается, в частности, путем уменьшения предварительного натяга клапанных пружин клапанов в полости Б.

Для практического решения данной задачи можно рекомендовать:

- установку сменной (по толщине) прокладки между седлом и ограничителем клапана, что приводит к изменению расчетной величины максимального перемещения пластин клапана и предварительного натяга пружин ($h_{кт} \neq \text{const}$ и $h_0 \neq \text{const}$) при сохранении величины $(h_{кт} + h_0) = \text{const}$.
- введение в конструкцию клапана промежуточного (подвижного) ограничителя подъема, обеспечивающего плавное изменение высоты подъема пластин ($h_{кт} \neq \text{const}$) и натяга пружин ($h_0 \neq \text{const}$) в процессе работы детандера при сохранении $(h_{кт} + h_0) = \text{const}$.
- установку под пружины клапана регулировочных шайб переменной толщины, обеспечивающих изменение натяга пружин ($h_0 \neq \text{const}$) при сохра-

нении $h_{кт} = \text{const}$.

2. Оснащение детандерных ступеней впускным клапаном со встроеным в седло толкателем, обеспечивающим принудительное открытие клапана при положении поршня вблизи ВМТ в случаях отклонения режима работы от расчетного, гарантирует работоспособность детандера на любом рабочем веществе, в широком диапазоне частот вращения вала, рабочих давлений и температур и различных относительных мертвых пространствах ступени.

3. Расчетный анализ работы детандерной ступени с учетом влияния объема присоединенных полостей и сечения патрубков на входе в эти полости показал, что при заниженном диаметре впускного патрубка наблюдается аномальная работа ступени, а именно большие газодинамические потери в процессе наполнения и недорасширение газа в момент прихода поршня в НМТ. В тоже время, анализ интегральных параметров работы детандерной ступени при переменном объеме впускной полости и "оптимальном" диаметре патрубка показал, что объем рабочей полости практически не влияет на текущие и интегральные параметры ступени.

4. Для обеспечения эффективности и долговечности работы уплотнительного узла дискового поршня на торцах поршневых колец следует выполнять радиальные разгрузочные каналы, способствующие равномерному распределению перепадов давления на кольцах уплотнительного узла и минимизации их износа при эксплуатации. Число, геометрические размеры и положение колец с разгрузочными каналами в уплотнительном узле определяется по методике, использованной в настоящей работе.

5. Путем воздействия на выпускные клапаны двухклапанной детандерной ступени в условиях эксплуатации можно обеспечивать плавное изменение расхода газа через детандер в диапазоне от 100 до 40% при сохранении постоянной конечной температуры газа и изознтропного КПД детандера. Одним из практически осуществимых способов реализации данного способа регулирования является перекрытие части выпускных клапанов.

6. В прямоточных ступенях поршневых детандеров средней и высокой производительности, выполняемых на современных многорядных высокооборотных базах, конвективный теплообмен газа со стенками рабочей камеры в процессах расширения и сжатия не оказывает существенного влияния на текущие и интегральные параметры ступени в широком диапазоне частот вращения вала. Интенсивность процессов теплообмена возрастает по мере уменьшения объема (массы газа) рабочей камеры, частоты вращения вала и не герметичности комплектующих узлов (клапаны и уплотнительные узлы поршня и штока) ступени.

7. Дифференцированная оценка количества теплоты подводимой (отводимой) к газу на отдельных участках рабочего цикла, приведенная в качестве примера на рис. 5 применительно к прямоточной детандерной ступени с двухклапанным газораспределением, позволила констатировать следующее:

- при заданном объеме цилиндра ступени детандера и величинах начального и конечного давления максимальное количество теплоты **отводится** от газа в процессе наполнения при минимальной частоте вращения вала;

- наибольшее количество теплоты **подводится** к газу на участках выхлопа и выталкивания независимо от частоты вращения вала;
- на участках расширения и сжатия количество **подведенной и отведенной** теплоты минимально и примерно одинаково, т.е. в герметичной ступени данные процессы протекают с показателем политропы расширения и сжатия по конечным параметрам $p_p \approx p_{сж} \rightarrow \kappa$;
- при сохранении качественной картины количественное соотношение подведенной (отведенной) теплоты на различных участках цикла может изменяться в зависимости от геометрических и режимных параметров ступени, свойств рабочего вещества, условий теплоизоляции ступени от окружающей среды, механического КПД детандера, уровня герметичности уплотнительных узлов и клапанов в закрытом состоянии и ряда других факторов. Для любой, произвольно выполненной конструкции детандерной ступени соотношение количеств подведенной (отведенной) теплоты в различных процессах цикла может быть определено с помощью предложенной в работе программы КОМДЕТ-М.

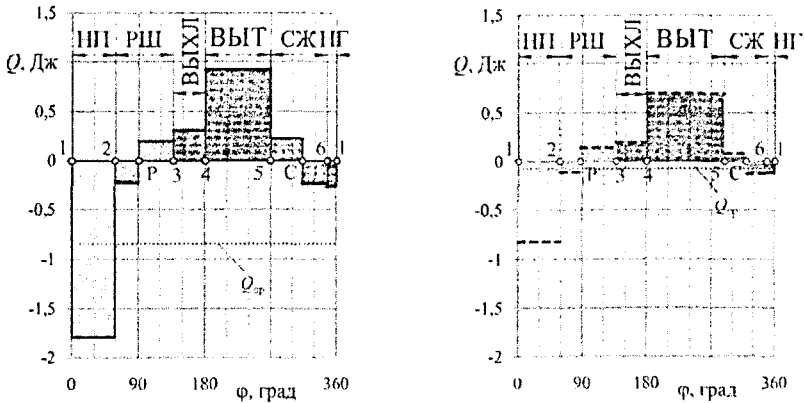


Рис. 5. Количество подведенной (отведенной) теплоты в прямоточной герметичной детандерной ступени при различной частоте вращения коленчатого вала
 — $n = 500$ об/мин - - - $n = 1500$ об/мин

Полученные в результате численного эксперимента данные и рекомендации легли в основу изложенной в диссертационной работе методики расчета и оптимального проектирования детандерных ступеней с поршнем двойного действия.

При проектировании детандерных агрегатов на нормализованных базах поршневых компрессоров основным условием является ограничение действующих усилий в пределах, допустимых для выбранной базы. Поэтому нет необходимости обоснования прочности элементов базы. Прочностные расчеты должны проводиться только для специфических деталей цилиндропоршневых групп, органов газораспределения, головок цилиндров и соединений различного типа.

В рамках настоящей работы по совершенствованию поршневых детандеров автором проведён цикл прочностных расчётов элементов самодействующих клапанов как наиболее подверженных действиям нагрузок и определяющих работоспособность агрегата в целом. Целью данного раздела диссертации являлось апробирование методики расчета с помощью программного комплекса ANSYS и подтверждение работоспособности пластин и седел самодействующих клапанов под действием предельно возможных перепадов давлений. Был изучен характер распределения напряжений и деформаций в пластине сферического клапана, в седле дискового клапана сложной формы и в контактной паре "пластина-седло".

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1. Усовершенствована математическая модель рабочих процессов машин объемного действия. Новизна модели заключается в следующем:

- учитываются реальные свойства рабочего вещества, что позволило проводить расширенный анализ работы ступени детандера на основе расчетных циклов в координатах $p - V$, $T - s$ и $h - m$ с дифференцированной оценкой количества подводимой к газу (отводимой от газа) теплоты и интенсивности процессов переноса массы на любом участке рабочего цикла;

- в модели учитываются особенности динамики подвижных элементов самодействующих впускных клапанов укомплектованных толкателем, наличие которого обеспечивает принудительное открытие клапана в конце процесса обратного сжатия независимо от соотношения давлений газа в цилиндре и впускной камере;

- моделируется процесс истечения газа из цилиндра через многорядные выхлопные окна различной конфигурации с наперед заданным суммарным проходным сечением и их расположением относительно ВМТ;

- учитываются особенности рабочих процессов в межкольцевых объёмах уплотнительного узла поршня двойного действия, разделяющего переднюю и заднюю полости цилиндра, рабочие циклы в которых смещены на $\varphi = 180^\circ$;

- расширен объем выходной информации, в качестве которой на печать в цифровой и графической форме выводятся текущие значения объёма рабочей камеры, давления, температуры, энтальпии, энтропии, плотности и массы газа в ней, перемещение и скорости перемещения каждой из пластин впускных и выпускных клапанов, комплекс показателей, характеризующих теплообмен и процесс переноса массы в рабочей камере и в межкольцевых объёмах уплотнительных узлов. На основе полученных текущих параметров формируется комплекс интегральных показателей, дающий полное представление о работе детандера.

2. На базе модернизированной детандерной ступени, укомплектованной сферическими клапанами с толкателем в седле, проведены натурные испытания детандера с одно- и двухклапанной системой газораспределения, в ходе которых записаны и обработаны экспериментальные индикаторные диаграммы. Путем сравнения расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм, соответствующих различным режимам работы детандера, подтвер-

ждена адекватность созданной математической модели.

3. По результатам численного эксперимента сделаны следующие выводы:

- показано превалирующее влияние на изменение параметров газа в ступени высокооборотных детандеров в процессах расширения и сжатия не герметичности клапанов и уплотнительных узлов поршня;

- установлены качественные закономерности и количественные соотношения, характеризующие интенсивность теплообмена газа со стенками рабочей камеры на различных участках цикла в функции от геометрических размеров цилиндра, отношения давлений в ступени, частоты вращения вала, температуры стенок цилиндра, продолжительности процессов наполнения-выхлопа-вытеснения и других факторов;

- показана возможность повышения долговечности элементов уплотнения поршня за счет разгрузки первого и последнего кольца уплотнительного узла;

- предложен способ изменения расхода газа в ступени низкого давления обеспечивающий постоянство конечной температуры за детандером;

- получена комплексная информация о работе детандерной ступени с поршнем двойного действия, использование которой позволяет более обоснованно выполнять предварительный термодинамический расчет вновь создаваемых детандеров различного назначения и исполнения.

4. Заложены основы расчета и оптимального проектирования ступеней детандеров с поршнем двойного действия. В частности, рекомендуется:

- выбор максимально возможного диаметра цилиндра в функции от номинального усилия принятой для проектирования стандартной базы;

- использование впускных клапанов со встроенными толкателями, обеспечивающими стабильную работу детандера на режимах, отличающихся от номинального (расчетного);

- использование методики оптимального проектирования ступени детандера с поршнем двойного действия при конструктивно одинаковых клапанах в передней и задней полостях ступени. Суть методики сводится к поиску и обоснованию такого сочетания геометрических параметров элементов ступени, при которых обеспечивается идентичность рабочих циклов в прямой и обратной полостях ступени и равенство конечных температур газа на выходе обеих полостей. Для этого, в качестве рационального технического решения, предлагается снижать предварительный натяг пружин клапанов, устанавливаемых в обратной полости цилиндра;

- при проектировании уплотнительного узла поршня двойного действия на части уплотнительных колец следует предусматривать радиальные разгрузочные каналы с целью обеспечения примерного равенства средних перепадов давлений на кольцах и их равномерного износа во времени.

- предложен способ изменения производительности высокооборотных детандеров с двухклапаным газораспределением, при котором конечная температура газа на выходе детандера остается постоянной.

5. Результатом анализа напряженно деформированного состояния элементов самодействующих клапанов является подтверждение работоспособности пластин и седел кольцевых и сферических клапанов при заданных на стадии

проектирования перепадах давления.

6. Разработанные методики реализованы в виде прикладной программы расчета КОМДЕТ-М, используемой сотрудниками кафедры «Криогенная техника» СПбГУНиПТ при выполнении НИиОКР и студентами в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

1. Арсеньев И.А. Теплообмен в ступенях поршневых компрессоров с различным объемом рабочего цилиндра [текст]./А.А. Прилуцкий, И.А. Арсеньев// Сборник: Труды VII МНТК молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин» ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа", г. Казань: Изд-во "Слово" – 2004 г. – С. 78 – 80.

2. Арсеньев И.А. Впускные клапаны поршневых детандеров с дисковыми неметаллическими пластинами [текст]./ И.А. Арсеньев, А.И. Прилуцкий, Ю.И. Молодова // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2006. – № 4/2006. – С. 20 – 21.

3. Арсеньев И.А. Особенности рабочих циклов и методики проектирования детандерных ступеней с поршнем двойного действия. [текст]./ И.А. Арсеньев, А.И. Прилуцкий, Д.Н. Иванов // Компрессорная Техника и Пневматика – 2007. – № 6/сентябрь/2007. – С. 18 – 19.

4. Арсеньев И.А. Сравнительный анализ целесообразности применения одно- и двухклапанной систем газораспределения в составе детандера высокого давления [текст]./ И.А. Арсеньев А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий, Ю.И. Молодова, А.А. Рыжков // Компрессорная Техника и Пневматика – 2008. – № 4/март/2008. – С. 19 – 27.

5. Арсеньев И.А. Особенности работы ступени поршневого детандера с двухклапанным газораспределением при переменном предварительном натяге пружин выпускных клапанов [текст]./ И.А. Арсеньев, А.И. Прилуцкий, Д.Н. Иванов, О.В. Цыганкова // Известия СПбГУНиПТ – 2009. – №1. – С. 23–27.

6. Арсеньев И.А. Учет реальных свойств рабочего вещества при моделировании процессов, протекающих в ступенях машины объемного действия [текст]./ И.А. Арсеньев, А.И. Прилуцкий, Д.Н. Иванов, О.В. Цыганкова, А.А. Рыжков // Известия СПбГУНиПТ – 2009. – №1. – С. 35 – 42.