

Автореферат
№23

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. №

001081

НАЛОБИН Леонид Васильевич

УДК 521.565.4:62-5

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДИЛЬНО-
ОСУШИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты холодильной и
криогенной техники и систем кондиционирования

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1989

Работа выполнена в Центральном институте авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Козорез А.И.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор Чайковский В.Ф.,
- кандидат технических наук,
- доцент Зеленовский В.Ф.

Ведущая организация: ГИПРОНИАВИАПРОМ, г. Москва

Защита состоится "22" января 1989 года в 11⁰⁰ час
на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одесском
институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу:
270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, дом 1/3, ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан "5" декабря 1989 года.

Ученый секретарь
специализированного совета
К.Т.Н., доцент

Р.К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. XXVII съезд КПСС поставил задачу всемерного повышения эффективности работы и быстрого использования достижений науки и техники при создании новых изделий.

Без выполнения экспериментальных работ невозможно достигнуть высокого уровня технических характеристик создаваемых летательных аппаратов по отдельным направлениям, а также подтвердить правильность применения технических решений, включая сертификационные испытания. Создание современных экспериментальных установок в авиационной промышленности превратилось в большую научно-техническую проблему, что нашло свое отражение в Постановлении Совета Министров СССР от 22 марта 1982 года № 521.

Составной частью экспериментальных установок является холодно-осушительная станция (ХОС), которая позволяет на земле моделировать высотные условия полета. На этих экспериментальных установках процесс охлаждения и осушки воздуха рассматривается как один из самых сложных не только у нас в СССР, но и за рубежом. Данная проблема усложнилась в настоящее время еще и тем, что резко возросла энерговооруженность двигателей летательных аппаратов и, как следствие, повысились требования к расходным и входным параметрам охлаждаемого и осушаемого воздуха. Поэтому в настоящее время невозможно обеспечить доводку существующих авиационных двигателей, а тем более проводить испытания новых двигателей с помощью старой ХОС. Таким образом, интенсификация энергетических процессов; разработка автоматических систем регулирования (АСР) и автоматизированной системы управления (АСУ) на базе цифровой микропроцессорной техники, позволяющей по заданной программе управлять технологическим процессом (ТП); создание на существующих производственных площадях ХОС нового поколения является важной и актуальной задачей, успешное решение которой позволяет значительно расширить возможности экспериментальных установок и повысить энергетическую эффективность проведения испытаний авиадвигателей в холодном и осушенном воздухе.

Цель работы. Повышение эффективности крупной автоматизированной холодно-осушительной станции нового поколения с широким диапазоном изменения входных параметров воздуха для обеспечения проведения испытаний новых и улучшения характеристик существующих образцов авиационных двигателей.

Эта цель достигнута путем: выбора оптимального термодинамического цикла и его параметров с использованием математической модели ХОС; разработки и оптимизации технологической схемы ХОС; разработки АСР и АСУ ТП ХОС, реализующей программное управление с помощью микро-ЭВМ; ис-

пользования результатов экспериментального исследования работы турбокомпрессорного агрегата и АСР ХОС на испытательном стенде, моделирующем натурные условия работы, и на секции ХОС в рабочих условиях.

Научная новизна работы заключается в постановке, обобщении и решении задачи оптимизации технологической схемы, ее параметров, способов регулирования, технологического оборудования; в разработке и создании испытательного стенда, моделирующего натурные условия; в экспериментальном исследовании на созданном испытательном стенде турбокомпрессора и АСР, в разработке методики проведения испытаний.

Научные положения, защищаемые в работе.

1. Идентичность характеристик фреоновых центробежных компрессоров, полученных при испытании на воздухе, гарантирует идентичность характеристик этих же центробежных компрессоров на R22 в диапазоне чисел Маха $M_u = 0,86 \div 1,15$ с погрешностью, не превышающей погрешность эксперимента.

2. В центробежном компрессоре с регулируемым диффузорным аппаратом максимальные нагрузки, определяющие прочность лопаток диффузора, возникают вблизи выходной кромки лопаток на нерасчетных режимах работы компрессора, а именно: для диффузорных лопаток первых колес низкотемпературной и высокотемпературной ступеней (НТС и ВТС) при минимальных углах установки диффузорного аппарата; для диффузорных лопаток последних колес обеих ступеней при максимальном угле установки диффузорного аппарата на режимах работы, близких к помпажному.

3. Использование предложенного способа испытания турбокомпрессора (А.С. СССР № 1048899 МКИ F 25 В 11/02 от 30.03.82), отличающегося тем, что охлаждение паров хладагента при высоком давлении ведут до промежуточной температуры, после чего охлажденный поток разделяют на две части, одну из которых дополнительно охлаждают, а дросселирование обеих частей ведут отдельно с последующим их смешением, что позволяет при отсутствии низкотемпературного источника тепла провести комплексное исследование турбокомпрессора и АСР ХОС в условиях, моделирующих натурные.

Основные научные результаты, полученные в работе.

1. Разработана и создана крупная автоматизированная ХОС нового поколения (рис. 1) для исследования новых и улучшения характеристик существующих образцов авиационных двигателей с широким диапазоном изменения входных параметров воздуха ($T_{вх} = 30 \div 45^\circ\text{C}$; $P_{вх} = 0,15 \div 0,3 \text{ МПа}$; $\alpha = 9 \div 16 \text{ г/кг}$; $G_{вх} = 15 \div 110 \text{ кг/с}$) и увеличенной холодопроизводительностью ($Q_o = 11,8 \text{ МВт}$).

2. В результате комплексного исследования разработанной мате-

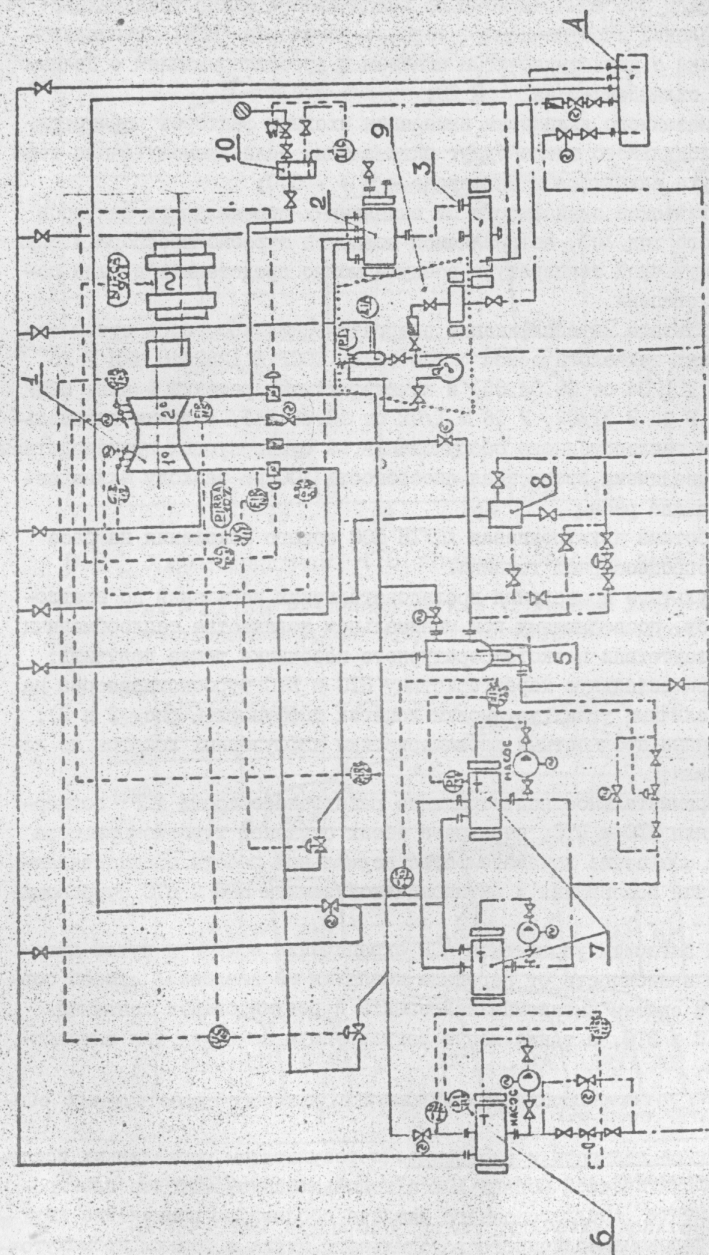


Рис. 1. Принципиальная схема фреоновой контура холодно-осушительной станции высоко-компрессорного комплекса.

матической модели парокомпрессионного холодильного цикла установлено:

а/ для условий высотно-компрессорного комплекса (ВКК) оптимален холодильный цикл с двухступенчатым сжатием и дросселированием с полным промежуточным охлаждением на R 22;

б/ для указанного диапазона изменения входных факторов параметры выбранного холодильного цикла будут оптимальны, если промежуточная температура воздуха находится в интервале $-5 \pm 5^\circ\text{C}$;

в/ аналитические зависимости от выявленных определяющих факторов эксергетического КПД ХОС, потребляемой мощности турбокомпрессора и оптимальной промежуточной температуры воздуха можно представить в виде полинома второй степени.

3. В результате интенсификации энергетических процессов путем совершенствования технологической схемы (а.с. СССР № 1282648 МКИ F 25 В 39/02, F 28 Д 1/04 от 28.04.85) и конструктивных решений (а.с. СССР № 1272842 МКИ F 25 В 31/02, F 16 М 1/02 от 13.08.84), а также оптимальной компоновки теплообменного оборудования на существующих производственных площадях увеличена пропускная способность ХОС по расходу охлаждаемого воздуха в два раза.

4. Разработана двухуровневая АСУТП ХОС нового поколения на базе цифровой микропроцессорной техники.

5. В результате проведения исследовательских испытаний по предложенному способу, позволяющему при минимальном количестве теплообменных аппаратов и отсутствии низкотемпературного источника тепла получить:

а/ экспериментальную характеристику НТС и ВТС турбокомпрессора на R 22 при различных углах установки лопаток диффузора (рис. 2 и 3);

б/ улучшенные прочностные характеристики диффузорных лопаток из легированной стали;

в/ экспериментальное подтверждение работоспособности АСР: поддержания всасывания НТС и ВТС, перегрева обеих ступеней турбокомпрессора и ограничения мощности; доказательство нормальной работы взаимосвязанных АСР давления всасывания и антипомпажной защиты НТС и ВТС турбокомпрессора;

г/ новый алгоритм управления АСР ограничения мощности путем дросселирования в зависимости от перепада давления на заслонке, способ совместной работы систем антипомпажной защиты и регулирования давления всасывания НТС и ВТС, а также новую регулирующую величину для антипомпажной защиты, сокращен объем пуско-наладочных испытаний в условиях существующего оборудования ХОС.

Практическая ценность и внедрение. По результатам проведенных исследований на математической модели ХОС с использованием методов планирования эксперимента, регрессионного анализа обосновано применение двухступенчатого парокомпрессионного холодильного цикла с полным промежуточ-

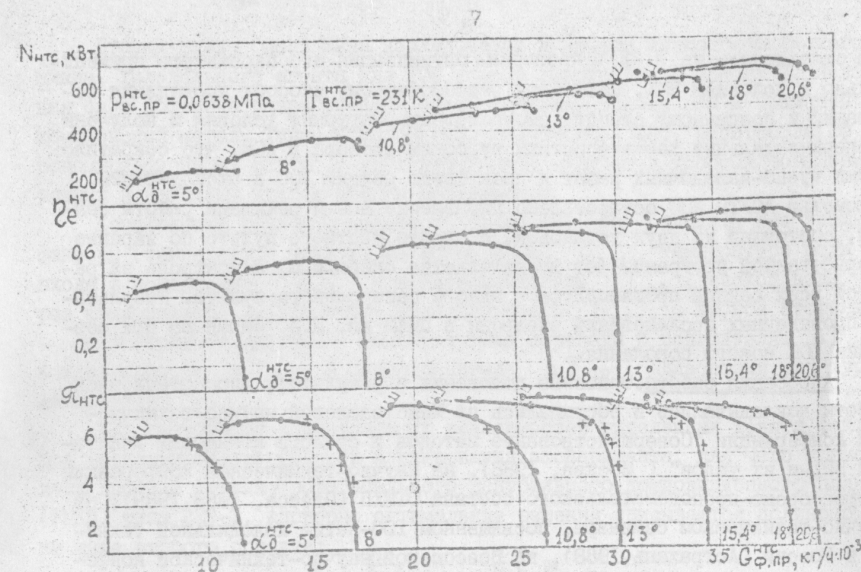


Рис. 2. Характеристики НТС турбокомпрессора, работающего на R22 при различных углах установки лопаток диффузоров.
● — турбокомпрессор N1; + — турбокомпрессор N7.

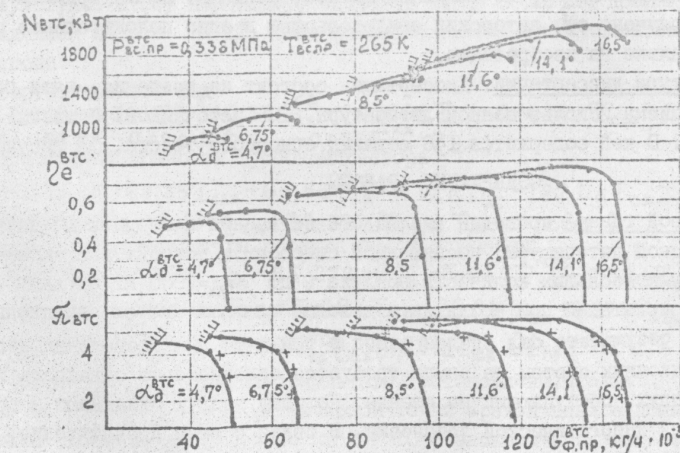


Рис. 3. Характеристики ВТС турбокомпрессора, работающего на R22 при различных углах установки лопаток диффузоров.
● — турбокомпрессор N1; + — турбокомпрессор N7.

ным охлаждением на R 22 и проведена оптимизация его параметров применительно к условиям ВКК. Благодаря разработанному способу проведения испытаний и созданному стенду, смоделированы натурные условия и получены экспериментальные характеристики турбокомпрессора и АСР, что сократило время пуско-наладочных работ и срок ввода секций ХОС в эксплуатацию. С помощью АСУТП ХОС осуществлено управление всеми режимами работы секции, состоящей из двух установок, с одного местного пульта по заранее разработанной программе без вмешательства оператора, а контроль за работой всех секций производится с одного центрального пульта. Результаты проведенных исследований внедрены в ЦИАМ им. П.И. Баранова при создании ХОС нового поколения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Межотраслевой научно-технической конференции "Совершенствование методов и средств стендовых испытаний ВРД и их узлов" (Москва, 1988), на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ОТИХП (Одесса, 1988, 1989), на научно-техническом семинаре, посвященном 100-летию холодильной техники в России (Астрахань, 1988), на Всесоюзной научно-технической конференции "Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслевого топливно-энергетического комплекса" (Сумы, 1989).

Публикации. Материалы работ опубликованы в 2-х статьях и 2-х тезисах докладов на научно-технических конференциях. По материалам диссертации получено три авторских свидетельства и одно положительное решение по заявке на изобретение.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (125 источников) и шести приложений. В ней содержится 146 страниц основного текста, 51 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы, посвященной способам и устройствам охлаждения и осушки больших количеств воздуха (до $G_{вх} = 1000$ кг/с) для проведения испытаний при создании и доводке сложных систем авиационной техники. В результате был сделан вывод о том, что для проведения испытаний авиационных систем на земле требуется одновременно охлаждать и осушать воздух, поступающий на стенды. Поэтому воздух охлаждают и осушают в одной энергетической установке. В связи с этим предпочтительнее следует отдать парокомпрессионной холодильной установке как наиболее гибкому способу и экономичному с точки зрения затрат энергии.

Вторая глава посвящена исследованию и выбору термодинамического цикла, холодильного агента для ХОС нового поколения. В основу исследования была положена разработанная математическая модель ХОС и применен комплексный метод. Таким образом была исследована ХОС, работающая по парокомпрессионному циклу: с двухступенчатым сжатием и дросселированием с полным и неполным промежуточным охлаждением.

Комплексный подход позволил, с одной стороны, охватить все внешние факторы (температура воздуха на входе в ХОС $T_{взд}^н$, температура воды на входе в конденсатор $T_{вд}^{ка}$ и в переохладитель $T_{вд}^{пр}$, расход воды через конденсатор $G_{вд}^{ка}$ и через переохладитель $G_{вд}^{пр}$), с другой стороны, — все внутренние факторы (температурные перепады в испарителях $\Delta T_{ис}$, в конденсаторе $\Delta T_{кд}$, в переохладителе $\Delta T_{пр}$, адиабатный кпд турбокомпрессора $\eta_{ад}$).

Для построения аналитических зависимостей выделенных девяти факторов воспользовались теорией планирования эксперимента, для чего применена дробная реплика ротatableльного центрального композиционного плана (РЦКП) типа 2E9-2. Априорно оптимальные решения описываются полиномом не выше второго порядка:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ij} — неизвестные коэффициенты;
 n — число факторов.

С помощью метода регрессионного анализа (МРА) для ХОС, работающей по двухступенчатому парокомпрессионному циклу с полным промежуточным охлаждением на R 22, были получены оценки коэффициентов уравнения регрессии:

$$\eta_e = 12,688 + 0,025 T_{взд}^{ка} + 0,31 G_{вд}^{ка} + 0,0006 \Delta T_{ис} - 0,0044 \Delta T_{кд} + 12,403 \eta_{ад} - 0,482 G_{вд}^{ка} \cdot \eta_{ад} - 0,036 T_{вд}^{ка} \cdot \eta_{ад}; \quad (2)$$

— потребляемой мощности турбокомпрессора

$$N_{\Sigma} = -3595,15 + 89,35 T_{взд}^{ка} + 65,55 T_{вд}^{ка} - 6,02 \Delta T_{ис} - 122,0 \Delta T_{кд} - 484,9 \Delta T_{пр} - 6,126 \eta_{ад} + 32,33 \Delta T_{кд} \Delta T_{пр}, \text{ кВт}; \quad (3)$$

— оптимальной температуры воздуха между ступенями

$$T_{взд}^{ка} = 315,36 + 5,702 T_{взд}^{н} - 55,272 \cdot G_{вд}^{ка} - 5,267 T_{вд}^{ка} - 0,524 T_{вд}^{пр} - 0,065 \Delta T_{ис} + 1,15 \Delta T_{кд} + 5,292 T_{пр} - 26,014 \eta_{ад} - 8,373 T_{взд}^{н} \cdot \eta_{ад} + 85,979 \cdot G_{вд}^{ка} \cdot \eta_{ад} + 8,193 T_{вд}^{ка} \cdot \eta_{ад} - 0,291 \Delta T_{кд} \Delta T_{пр}, \text{ К}. \quad (4)$$

Анализируя полученные результаты, установлено, что на R 22, как и на R 12, с энергетической точки зрения цикл с полным промежуточным охлаждением примерно на 7 — 10 % экономичнее, чем парокомпрессионный холодильный цикл с неполным промежуточным охлаждением (рис.4).

Сравнивая пароконденсационные холодильные циклы с хладагентами R12 и R 22, можно видеть, что эксергетический КПД η_e холодильного цикла на R 12, как правило, примерно на 1-2 % выше, чем на R 22, т.е. с энергетической точки зрения R 12 обладает более совершенными термодинамическими свойствами. Несмотря на это, R 12 не может быть рекомендован в качестве перспективного хладагента для ХОС нового поколения, т.к. он является озоноразрушающим хладагентом и его производство предлагается значительно сократить.

Третья глава посвящена разработке ХОС нового поколения, которая работает по двухступенчатому пароконденсационному холодильному циклу с полным промежуточным охлаждением на R 22, а в качестве теплоносителей используются для НТС водный раствор хлористого кальция (CaCl_2), для ВТС водный раствор этиленгликоля ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$).

ХОС работает в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок и имеет большое (до трех за сутки) число запусков. В связи с этим турбокомпрессор ХОС нового поколения должен иметь регулирующие устройства, которые позволяли бы изменять его холодопроизводительность в соответствии с тепловой нагрузкой. Проведенный анализ известных способов регулирования показал, что для регулирования турбокомпрессора целесообразно комбинированное регулирование, включающее в себя регулирование холодопроизводительности при поддержании постоянного давления в испарителях НТС и ВТС путем поворота лопаток диффузора, ограничения мощности, потребляемой электродвигателем турбокомпрессора, путем дросселирования на всасывании и антипомпажную защиту путем перепуска хладагента с нагнетания на всасывание. Такое комбинированное регулирование позволяет значительно расширить зону устойчивой работы турбокомпрессора.

Отличительной особенностью разработанной технологической схемы ХОС является то, что ресивер выполняет функцию линейного ресивера во время работы ХОС и функцию емкости для хранения жидкого хладагента при неработающей ХОС. Этим обеспечивается надежный контроль за количеством хладагента в секции ХОС и его сохранность. Кроме того, перепуск хладагента из конденсатора на всасывание НТС и ВТС турбокомпрессора позволяет осуществить работу ХОС при нулевой холодопроизводительности во время запуска и во время отсутствия тепловой нагрузки. Для уменьшения отрицательного влияния гидростатического давления жидкого хладагента и с целью интенсификации теплообмена в кожухотрубном испарителе затопленного типа производится его доработка, заключающаяся в том, что осуществляется барботирование струйным насосом паров хладагента в испарителе или орошение жидким хладагентом трубного пучка. Для уменьшения уноса масла из вспомогательного поршневого компрессора во фреоновый контур, улучшения теплообмена в испарителях, и повышения надежности работы компрессора в

его картере установили перегородку, которая уменьшает поверхность контакта фреона с маслом. Для уменьшения протяженности трубопроводов, числа сварных и фланцевых соединений и, как следствие, возможных мест утечки фреона оптимальным является размещение в два этажа ХОС нового поколения на существующих площадях.

ХОС нового поколения оснащена двухуровневой АСУТП. На данном этапе разработки микро-ЭВМ второго уровня используется в режиме программного управления и в режиме советчика. На первом уровне применены АСР технологических величин с микропроцессорными регуляторами, реализующими ПИД-закон регулирования. Использование этих регуляторов позволяет повысить быстродействие систем и получить качественное регулирование технологических величин.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию разработанного фреонового центробежного турбокомпрессора для ХОС нового поколения. Испытания головного (опытного) образца турбокомпрессора № 1 были отнесены к исследовательским, так как он является уникальным как по холодопроизводительности $Q_0 = 11,8$ МВт, так и по использованию в качестве хладагента R 22 для температурного уровня $t_0 = -50^\circ\text{C}$. Для проведения исследовательских испытаний турбокомпрессора № 1 был разработан специальный стенд и предложен способ проведения испытаний, реализация которого позволяет провести комплексное экспериментальное исследование турбокомпрессора, включая АСР ХОС в условиях, моделирующих натурные при отсутствии низкотемпературного источника тепла требуемой мощности ($Q_0 = 11,8$ МВт). Характеристики головного образца турбокомпрессора № 1 на R 22, построенные по результатам испытаний и приведенные к расчетным параметрам на входе в ступени при различных углах установки лопаток диффузора α_d , изображены на рис. 2 для НТС и на рис. 3 для ВТС. Зависимость степени повышения давления π_k , адиабатного КПД $\eta_{ад}$ и потребляемой мощности N от весового расхода воздуха G устанавливалась отдельно для НТС (рис. 5) и для ВТС (рис. 6) турбокомпрессоров № 1 - 8 при полностью открытых лопатках диффузора. Из рис. 5 и 6 видно, что степень повышения давления π_k , адиабатный КПД $\eta_{ад}$ и мощность N турбокомпрессоров № 1-8 находится внутри доверительного интервала, т.е. их характеристики на воздухе идентичны между собой. Пуско-наладочные испытания турбокомпрессора № 7, проведенные на ВКК ЦИАМ, показали идентичность характеристик турбокомпрессора № 1 и № 7 (рис. 1 и 3).

Таким образом, экспериментально доказано, что идентичность характеристик фреоновых центробежных турбокомпрессоров полученных при испытаниях на воздухе гарантирует идентичность характеристик этих же турбокомпрессоров на R 22 в диапазоне чисел Маха $M_u = 0,86 \pm 1,15$ с погрешностью, не превышающей погрешность эксперимента.

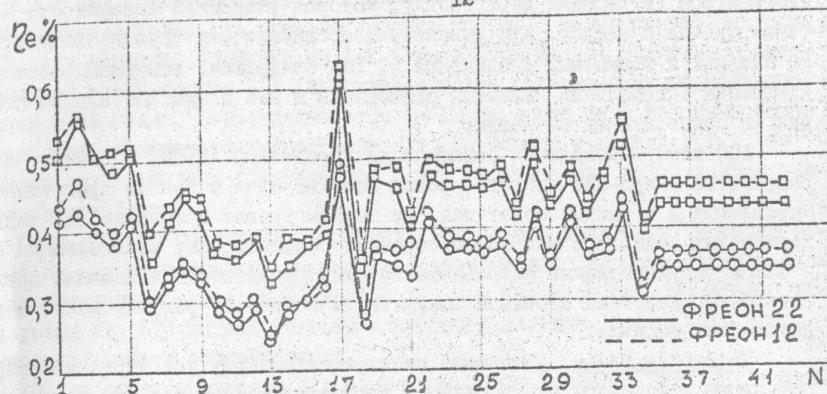


Рис. 4. Зависимость эксергетического к.п.д. η_e от номера эксперимента:
 ○ — парокompрессионный холодильный цикл с неполным промежуточным охлаждением;
 □ — парокompрессионный холодильный цикл с полным промежуточным охлаждением.

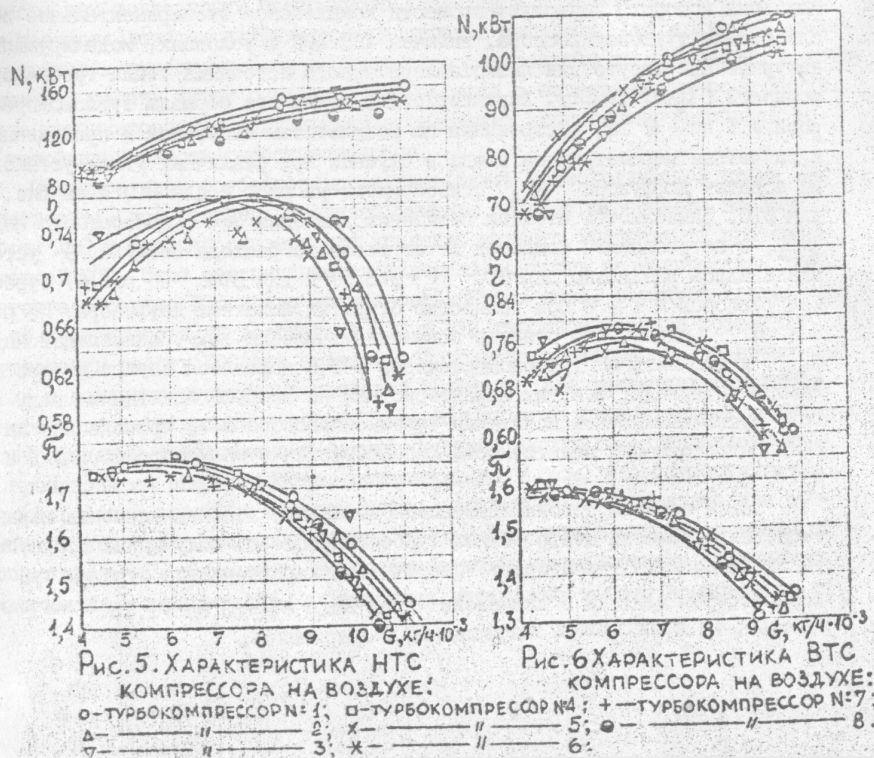


Рис. 5. Характеристика НТС компрессора на воздухе:

○ — турбокомпрессор № 1; □ — турбокомпрессор № 4;
 △ — " " № 2; × — " " № 5; ● — " " № 8;
 ▽ — " " № 3; * — " " № 6.

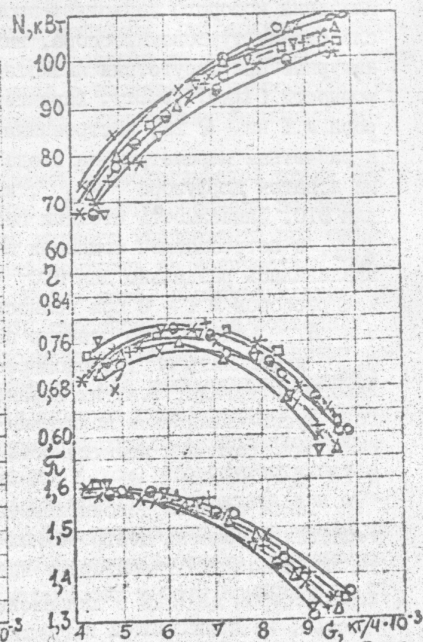


Рис. 6. Характеристика ВТС компрессора на воздухе:

○ — турбокомпрессор № 1; □ — турбокомпрессор № 4;
 △ — " " № 2; × — " " № 5; ● — " " № 8;
 ▽ — " " № 3; * — " " № 6.

В рамках исследовательских испытаний проведены исследования лопаток диффузора по определению рабочих нагрузок, усталостной прочности и эксплуатационной надежности. Установлено, что напряжения на входных кромках в процессе эксплуатации низки, а предел усталости входной кромки в месте заделки выше, чем на выходной. Максимальные напряжения на выходной кромке диффузора для 1-го и 4-го колес возникали при минимальном угле установки регулируемого диффузорного аппарата и именно этот режим работы турбокомпрессора определяет прочность лопаток диффузора первых колес для НТС и ВТС. При максимальном угле установки регулируемого диффузорного аппарата наибольшие нагрузки (напряжения) действуют на лопатки диффузора последних колес № 3 и № 6 в обеих ступенях на режимах работы турбокомпрессора, близких к помпажному. Исследования показали, что коэффициенты запаса прочности лопаток диффузора оказались низкими, поэтому была произведена их конструктивная и технологическая доработка. Новые лопатки диффузора изготовили из одной детали, толщину пера в выходной части увеличили с 0,008 до 0,01 м. Этим было достигнуто повышение предела усталости лопаток и понижение рабочих напряжений, что позволило повысить коэффициент запаса усталостной прочности до значений больших четырех.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию следующих основных АСР: давления всасывания R 22 НТС; давления всасывания R 22 ВТС; перегрева паров на входе в НТС; перегрева на входе в ВТС; давления конденсации паров R 22; антипомпажной защиты НТС и ВТС турбокомпрессора; ограничения мощности, потребляемой синхронным электродвигателем турбокомпрессора.

Цель исследования заключалась в проверке работоспособности в статических и динамических режимах АСР и защит, взаимосвязанных через управляемый объект, а также в получении данных, необходимых для внедрения этих систем.

В результате исследований, проведенных на стенде в условиях моделирующих натурные, доказана работоспособность АСР давления всасывания НТС и ВТС, перегрева паров R 22 на входе в НТС и ВТС и системы ограничения мощности. Установлена возможность нормальной работы взаимосвязанных АСР давления всасывания и антипомпажной защиты НТС и ВТС турбокомпрессора. Проанализирована количественная оценка качества регулирования основных регулирующих величин — давления всасывания НТС и ВТС, давления конденсации при внесении искусственных возмущений изменением задания регулятором и нагрузки турбокомпрессора. По результатам исследований внесены усовершенствования в АСР ограничения мощности и в АСР антипомпажной защиты, которые повышают надежность их работы.

В приложении приведены результаты комплексного исследования математической модели ХОС, основные параметры технологической схемы ХОС и исследовательского испытательного стенда.

ВЫВОДЫ

1. Применение разработанной математической модели двухступенчатого парокompрессионного цикла, методов планирования эксперимента и регрессионного анализа позволило сократить объем экспериментальной работы, дало возможность проанализировать значимость и степень влияния факторов на выходную величину, а также позволило получить математическое описание (в виде полинома второй степени) оптимальных решений с учетом всех основных факторов.

2. В результате исследования, проведенного на математической модели, установлено, что в качестве термодинамического цикла ХОС нового поколения следует использовать парокompрессионный холодильный цикл с двухступенчатым сжатием и дросселированием с полным промежуточным охлаждением на

Р 22. Термодинамические параметры этого холодильного цикла оптимальны при колебаниях промежуточной температуры охлаждаемого воздуха в диапазоне $-5 \div +5^\circ\text{C}$ для всего возможного диапазона изменения входных параметров воздуха и охлаждающей воды.

3. Реализация работы ХОС в широком диапазоне изменения холодопроизводительности ($Q_0 \approx 0 \div 12\text{МВт}$) требует применения комбинированного регулирования производительности турбокомпрессора путем: поворота лопаток диффузора для поддержания постоянного давления на всасывании НТС и ВТС; дросселирования на всасывании НТС и ВТС для ограничения мощности, потребляемой электродвигателем турбокомпрессора; перепуска Р 22 из конденсатора на всасывание НТС и ВТС для антипомпажной защиты.

4. Разработана двухуровневая АСУТП ХОС: на первом уровне применены АСР с микропроцессорными регуляторами, реализующими ПИД - закон регулирования; на втором уровне применены микро-ЭВМ, реализующие программное управление. На испытательном стенде в условиях, моделирующих натурные, доказана работоспособность АСР и установлена возможность их устойчивой совместной работы.

5. Предложенный стенд и способ проведения исследовательских испытаний головного образца турбокомпрессора позволяет при минимальном количестве теплообменных аппаратов и отсутствии низкотемпературного источника тепла получить характеристики его на Р 22 в условиях, моделирующих натурные, и провести прочностные исследования лопаток диффузора.

6. В результате проведения приемо-сдаточных испытаний получены идентичные характеристики турбокомпрессорных агрегатов на воздухе, а идентичные характеристик турбокомпрессора № 7 и головного образца № 1 на

Р 22 доказывает, что имеет место идентичность характеристик остальных турбокомпрессоров из серии на Р 22.

7. При проведении исследовательских испытаний установлено, что

максимальные напряжения, определяющие прочность лопаток диффузора, возникают на выходной кромке лопатки на нерасчетных режимах работы, а именно: для диффузорных лопаток первых колес НТС и ВТС при минимальных углах установки диффузорного аппарата; для диффузорных лопаток последних колес НТС и ВТС при максимальных углах установки диффузорного аппарата на режимах работы турбокомпрессора, близких к помпажному.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.С. 1048899 СССР, МКИ F 25 В 11/02. Способ испытания холодильного турбокомпрессора / Л.В. Налобин и др. (СССР) - № 3416184/23-06; заявл. 30.03.82.

2. А.С. 1272842 СССР, МКИ F 25 В 31/02; F 16 М 1/02. Картер герметичного холодильного компрессора / Л.В. Налобин, В.Г. Букин СССР - № 3787957/23-06; заявл. 13.06.84.

3. А.С. 1282648 СССР, МКИ F 25 В 39/02; F 28 Д 1/04. Кожухотрубный испаритель затопленного типа / Л.В. Налобин, В.Г. Букин (СССР) - № 3920219/23-06; заявл. 28.06.85.

4. Козорез А.И., Радковский О.В., Муратов Ю.И., Замковец В.Н., Налобин Л.В. Экспериментальное исследование центробежного компрессора с поворотными лопатками диффузоров, работающего на Р 22 // Респ. сб. "Холодильная техника и технология". - 1989. - Вып. 49. - С. 15-19.

5. Математическая модель для управления с помощью ЭВМ двухступенчатой холодильной турбокомпрессорной установкой в широком диапазоне тепловых нагрузок / А.И. Козорез, Ю.И. Муратов, О.В. Радковский, В.Н. Замковец, Л.В. Налобин; Одес. технол. институт холод. пром-ти.-Одесса, 1986. - 23 с. библиогр: 9 назван. деп. в УкрНИИТИ г. Киев, 23.09.86, № 2290-УК 86.

6. Налобин Л.В., Замковец В.Н., Аннушкина Л.П. Автоматизированная холодно-осушительная установка высотно-компрессорного комплекса // тез. док. межотраслевой науч.-тех. конф. "Совершенствование методов и средств стендовых испытаний ВРД и их узлов". - М., 1989.

7. Козорез А.И., Радковский О.В., Муратов Ю.В., Налобин Л.В. Экспериментальное исследование центробежного компрессора с поворотными лопатками диффузора, работающего на Р 22 // тез. док. Всесоюзной научно-техн. конф. "Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса". Сумы, 1989.

8. А.С. по заявке № 4402393/06 заявл. 4.04.88 СССР, МКИ G 05 В 15/00, G 05 В 19/00. Способ оптимального управления двухступенчатой холодильной турбокомпрессорной установкой / Л.В. Налобин и др. (СССР).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ХОС - холодильно-осушительная станция; АСР - автоматическая система регулирования; АСУТП - автоматизированная система управления технологическим процессом; НТС - низкотемпературная ступень; ВТС - высокотемпературная ступень; ВКК - высотно-компрессорный комплекс; РЦКП - ротатальный центральный композиционный план; M_u - число Маха; $T_{вх}$ - температура воздуха на входе; $P_{вх}$ - давление воздуха на входе; d - влагосодержание; Q_o - холодопроизводительность; $G_{вх}$ - массовый расход на входе; $T_{вд}^{ка}$ - температура воды на входе в конденсатор; $T_{вд}^{пр}$ - температура воды на входе в переохладитель; $G_{вд}^{ка}$ - массовый расход воды через конденсатор; $G_{вд}^{пр}$ - массовый расход воды через переохладитель; $\Delta T_{ис}$ - температурный перепад в испарителе; $\Delta T_{ка}$ - температурный перепад в конденсаторе; $\Delta T_{пр}$ - температурный перепад в переохладителе; $\eta_{ад}$ - адиабатный кпд турбокомпрессора; η_e - эксергетический кпд; N_z - мощность, потребляемая турбокомпрессором; $T_{взд}$ - оптимальная температура воздуха между ступенями; α_d - угол поворота лопаток диффузора; π_k - степень повышения давления.

Mus

