

498416

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

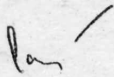
На правах рукописи

УДК 621.515
621.574.041

Савельева Ирина Юльевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТУРБОХОЛОДИЛЬНЫХ
МАШИН НА НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и криогенной
техники и систем кондиционирования



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1992

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском,
проектно-технологическом институте холодильного машиностро-
ения (ВНИИхолодмаш)

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Ф.М.Чистяков

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Н.Н.Бухарин

- кандидат технических наук,
доцент Н.А.Смирнов

Ведущая организация - НИИ "Турбокомпрессор" г.Казань

Защита " 9 " марта 1992 г. в
19

в Моск
им.Н.Э
д.1, п

К053.15.07
те
кая наб.,

ЗЫВ Р
по ад

. Ваш от-
а высылать

Н.Э.

се МГТУ им.

М 498416

В.Н.Козлов

Актуальность работы. В химической, нефтехимической, угольной промышленности, а также в системах кондиционирования воздуха широко используются водоохлаждающие парокompрессионные турбохолодильные машины типа ТХМВ. Парк машин этого типа, выпускаемых Казанским компрессорным заводом, составляет около 70 единиц в год.

Анализ реальных условий работы холодильных машин (ХМ) показывает, что значительную часть времени они работают в режимах, отличающихся от расчетных. Если резервы повышения эффективности на расчетных режимах работы в значительной степени исчерпаны, то повышение эффективности работы на нерасчетных режимах остается главным резервом экономии энергии.

При отклонении параметров среды от расчетных для поддержания требуемых режимов используются различные способы регулирования. Анализ способов регулирования с точки зрения их применимости и эффективности использования для рассматриваемого типа ХМ необходим при разработке новых образцов холодильной техники.

Цель работы. Повышение эффективности ХМ типа ТХМВ на нерасчетных режимах работы при использовании регулирования холодопроизводительности частотой вращения ротора компрессора, с помощью входного регулирующего аппарата (ВРА) и совместно частотой вращения и с помощью ВРА.

Методы исследования. В работе использованы методы математического моделирования холодильных центробежных компрессоров (ХЦК) и ХМ в целом, а также экспериментальные методы при исследовании натурных ХМ и ХЦК на стендах Казанского компрессорного завода.

Научная новизна. Систематизированы нерасчетные режимы работы ХМ. Математическая модель ХМ обобщена на случай нерасчетных режимов. Разработана расчетная методика получения характеристик ступеней ХЦК на режимах регулирования. Математическая модель ХМ реализована для различных вариантов условий эксплуатации. Исследована эффективность работы ХМ типа ТХМВ при различных условиях эксплуатации и графиках загрузки. Рассмотрено



регулирование с помощью ВРА, частотой вращения, а также одновременное использование этих способов. Проведен анализ затрат энергии для трех способов регулирования и при регулировании с помощью ВРА для различных вариантов согласования характеристик ступеней компрессора.

Практическая ценность результатов работы заключается в создании методик, алгоритмов и программ для ЭВМ расчета ХМ на режимах регулирования для различных условий эксплуатации. Предложенные алгоритмы позволяют полностью автоматизировать процесс расчета ХМ на стадии проектирования, обеспечивая высокую точность результатов и снижение трудоемкости, что существенно сокращает сроки создания новых машин.

Рекомендации, полученные в результате работы, использованы во ВНИИхолодмаш при разработке нового ряда ХМ.

Алгоритмы, программы обработки на ЭВМ результатов экспериментальных исследований позволяют оперативно получать информацию о ходе эксперимента и используются на Казанском компрессорном заводе при испытании опытных образцов ХМ.

Разработан алгоритм получения параметров регулирования ХМ, ориентированный на использование в автоматизированных системах управления ХМ на местах эксплуатации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Седьмой Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок" (Казань, 1985 г.); Восьмой Всесоюзной научно-технической конференции "Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса" (Сумы, 1989 г.); Всесоюзном научно-техническом семинаре "Повышение эффективности тягодутьевого оборудования для энергетики и машиностроения" (Красноярск, 1991г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Холод народному хозяйству" (Ленинград, 1991); научно-техническом совете ВНИИхолодмаш, научно-техническом семинаре кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из

введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 11 наименований. Работа изложена на 156 страницах, содержит 4 рисунка и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы направления работы.

В ГЛАВЕ 1 приведен обзор литературы по исследованию работы ХМ на нерасчетных режимах.

Нерасчетные режимы работы характеризуются, во-первых, совокупностью параметров, отклоняющихся от расчетных значений, во-вторых, глубиной и продолжительностью этих отклонений. В результате анализа работы ХМ выделены три наиболее распространенных варианта условий эксплуатации. Первый вариант предусматривает изменение температуры t_{w1} теплоносителя на входе в конденсатор, при этом условия производства обязывают поддерживать холодопроизводительность Q_0 постоянной. Во втором варианте при постоянной температуре t_{w1} от расчетного значения отклоняется Q_0 . Наконец, третьем варианте t_{w1} и Q_0 меняются совместно по определенному закону. При этом температура хладоносителя на выходе из испарителя и расходы тепло- и хладоносителя G_w , G_s во всех случаях поддерживаются постоянными.

Глубина и продолжительность отклонений параметров среды от расчетных значений характеризуются графиками загрузки. Типичные графики загрузки по холодопроизводительности были получены П.Г. Александровским на основании обработки статистических данных. В работе использованы два из них: режимы глубокого и среднего регулирования. Графики изменения температур теплоносителя в связи с сезонными колебаниями приняты исходя из данных СНИПа "Строительная климатология и геофизика" для средней полосы СССР. Сочетания графиков загрузки по Q_0 с графиками изменения температур для трех описанных выше условий эксплуатации позволили выделить семь характерных эксплуатационных режимов.

Для поддержания требуемых режимов работы ХМ при отклонении параметров среды от расчетных используются различные способы регулирования. Анализируются возможные способы регулиро-

вания холодопроизводительности центробежных ХМ с точки зрения их эффективности. Наибольший интерес представляет регулирование с помощью ВРА и частотой вращения ротора компрессора. Для сравнительной оценки эффективности регулирования этими методами холодопроизводительности конкретных ХМ и получения количественных данных необходимо иметь возможность в короткие сроки и с достаточной точностью получать расчетные характеристики ХМ на режимах регулирования.

Проведен анализ существующих методов расчета ХМ и ЦК. В основу исследования работы ТХМ положены результаты, полученные отечественными исследователями, в первую очередь учеными МГТУ Ф.М.Чистяковым, А.С.Нуждиным, ЛТИХПа Н.Н.Бухариным, ВНИИхолодомаш А.В.Быковым, И.М.Калниным, И.Я.Сухомялиновым.

Делается вывод о том, что наиболее перспективными в настоящее время становятся методы расчета, основанные на математическом моделировании. Они отличаются наибольшей достоверностью и универсальностью. Для ХМ с ЦК наиболее удобной оказывается математическая модель, предложенная И.Я.Сухомялиновым. Однако эта математическая модель в исходном варианте не учитывала возможность работы ХМ на режимах регулирования.

Принципиальное значение для оценки технических систем имеет выбор критериев эффективности. Комплексная постановка задачи оптимизации ХМ детально исследована в работах И.М.Калнина. В работах И.Я.Сухомялинова и П.Г.Александровского решается частная задача оптимизации, чаще всего встречающаяся в практике проектирования и особенно при эксплуатации. Она заключается в минимизации общего расхода энергии при работе ХМ в соответствии с конкретным графиком загрузки. График загрузки условно разбивается на отрезки, характеризующиеся постоянными значениями Q_0 . При этом расход энергии определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \tau_{\text{общ}} \cdot Q_{\text{он}} \sum_{j=1}^k \frac{\bar{\tau}_j \bar{Q}_{0j}}{\xi(Q_{0j})} \quad (1)$$

где

$\tau_{\text{общ}}$ - общее время работы;

$Q_{\text{он}}$ - холодопроизводительность на номинальном режиме работы;

k - число участков графика загрузки, характеризующихся постоянными значениями холодопроизводительности;

$\bar{Q}_{0j}$ - холодопроизводительность на j -м участке графика загрузки, отнесенная к холодопроизводительности на номинальном режиме работы;

$\bar{\tau}_j$ - время работы на j -м участке графика загрузки, отнесенное к общему времени работы;

$\xi(\bar{Q}_{0j})$ - холодильный коэффициент на j -м участке.

Проведенный анализ позволил сформулировать основные задачи исследования:

1. Анализ и систематизация нерасчетных режимов работы ХМ;
2. Доработка математической модели холодильной машины в плане учета возможности работы ХМ на режимах регулирования;
3. Реализация математической модели ХМ и автоматизация расчетов для различных условий эксплуатации. Разработка методик, алгоритмов и программ для ЭВМ;
4. Разработка методик, алгоритмов и программ обработки результатов эксперимента на стенде ККЗ;
5. Проведение экспериментальных исследований натуральных ХМ на режимах регулирования с целью проверки правильности методик и программ расчета характеристик ХМ по математической модели;
6. Проведение расчетно-теоретического анализа работы ХМ при регулировании с помощью ВРА, частотой вращения и совместно ВРА и частотой вращения. Разработка рекомендаций по выбору оптимального способа регулирования для реальных условий эксплуатации;

7. Проведение расчетно-теоретического анализа работы ХМ с различными вариантами согласования характеристик ступеней при регулировании с помощью ВРА для различных вариантов условий эксплуатации. Разработка методики оптимизации согласования характеристик ступеней с учетом реальных графиков загрузки;

8. Создание расчетной модели ХМ, пригодной для использования в АСУ, на базе аппроксимации зависимостей, полученных в результате расчета по предложенной математической модели.

В ГЛАВЕ 2 математическая модель ХМ, предложенная И.Я. Сухоминовым, обобщается на случай работы ХМ в режимах регулирования. Проводится полная алгоритмизация методик расчетов на этапах получения регулировочных характеристик ступеней ХПК, а также суммарных характеристик ХМ для различных условий эксплуатации.

Удобство выбранной формы математической модели заключается в том, что каждый из трех основных элементов ХМ: компрессор, испаритель и конденсатор - описывается самостоятельными уравнениями, в которые входят термодинамические параметры цикла и учитываются конструктивные особенности элементов ХМ.

Введение регулирования холодопроизводительности компрессора частотой вращения ротора n и изменением геометрического угла поворота лопаток ВРА θ_A , определяющего угол закрутки потока θ на входе в первую ступень, приводит к изменению только характеристик компрессора. Общая система уравнений математической модели ХМ имеет вид:

$$Q_0 = f_1(t_k, t_0, \theta_A, n) \quad (2)$$

$$Q_k = f_2(t_k, t_0, \theta_A, n) \quad (3)$$

$$Q_k = G_w C_w (t_{w2} - t_{w1}) \quad (4)$$

$$t_k = t_{w1} + Q_k / [1000 G_w C_w (1 - e^{-a_k})] \quad (5)$$

$$Q_0 = G_s C_s (t_{s1} - t_{s2}) \quad (6)$$

$$t_0 = t_{s2} - Q_0 / [1000 G_s C_s (e^{a_0} - 1)] \quad (7)$$

В этих уравнениях применены следующие обозначения:

t_0, t_k - температуры кипения и конденсации;

Q_k - тепловой поток в конденсаторе;

t_{w2} - температура теплоносителя на выходе из конденсатора;

t_{s1} - температура хладоносителя на входе в испаритель;

C_s, C_w - теплоемкости хладо- и теплоносителя;

K_0, K_k - коэффициенты теплопередачи испарителя и конденсатора;

F_0, F_k - площади поверхностей теплообмена испарителя и конденсатора;

$$a_k = K_k F_k / (G_w C_w);$$

$$a_0 = K_0 F_0 / (G_s C_s).$$

Исходными для получения характеристик ХЦК вида (2), (3) служат характеристики модельных ступеней, в виде зависимостей изоэнтروпных коэффициентов удельной работы Ψ_s^* и полезного действия η_s^* от коэффициента расхода M_{co} и условного числа Маха M_u с учетом геометрии ступеней (влияние геометрии условно обозначено параметром Γ):

$$\Psi_s^*, \eta_s^* = f(M_{co}, M_u, \Gamma) \quad (8)$$

Для реализации математической модели разработан алгоритм

получения регулировочных характеристик ступеней. За основу взята разработанная во ВНИИХолодмаш методика получения регулировочных характеристик, которая заключается в пересчете характерных точек характеристик ХЦК при нулевом угле поворота лопаток ВРА на режимы регулирования. Дополнительно учтено наличие вертикальной касательной на правой ветви характеристики, что физически объясняется запиранием ступени, и то, что при нулевом угле поворота известны не только характерные точки, но, с высокой точностью, вся характеристика ступени. Эти данные учтены выбором аппроксимирующей функции специального вида с избыточным параметром ν в качестве показателя степени основной переменной:

$$g(t) = a_1[(a_2 - t^\nu)^{1/2} - a_3(a_2 - t^\nu)] \quad (9)$$

Неизвестные коэффициенты функции a_1, a_2, a_3 определяются по известным характерным точкам. Для их определения построен сходящийся итерационный алгоритм. Оптимальное значение избыточного параметра определялось из условия минимума функции

$$F(\nu) = \sum_{i=1}^{20} [g(t_i) - f_i]^2 \quad (10)$$

которая характеризует отклонение аппроксимирующей кривой от исходной характеристики в 20 точках. Найденное таким образом значение избыточного параметра ν сохранялось в дальнейшем при построении регулировочных характеристик для ненулевых углов закрутки потока.

Достоверность предложенной методики подтверждена при расчете регулировочных характеристик первой ступени компрессора ЗОТХМВ4000-2. Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными данными. Сопоставление подтвердило правомерность предложенной методики для расчета характеристик ступени на режимах регулирования с точностью ~1%.

Следующей задачей, решенной в работе, явилась реализация математической модели ХМ для описанных выше вариантов условий эксплуатации.

С математической точки зрения задача сводится к решению шести нелинейных уравнений (2 ... 7) относительно неизвестных, определяемых условиями эксплуатации, и осложняется тем, что правые части уравнений (2) и (3) математической модели заданы

в виде банков данных. Разработаны алгоритмы и программы для ЭВМ, позволившие автоматизировать процесс расчета регулировочных характеристик ХМ.

Однако из-за использования банков данных и алгоритмов численного решения уравнений расчеты регулировочных характеристик ХМ по предложенной методике все же оказываются достаточно громоздкими. Если на стадии проектирования это не является существенным ограничением, то на стадии эксплуатации, когда решение о выборе значения регулировочного параметра должно приниматься в реальном времени, требуется более компактный алгоритм.

Предложено после проведения расчетов регулировочных характеристик ХМ аппроксимировать их, создав компактный банк данных коэффициентов аппроксимации, а затем на этапе оперативного управления на местах эксплуатации для требуемых режимов работы, используя этот банк, определять с помощью ЭВМ значения регулировочных параметров.

Разработана специальная методика аппроксимации характеристик ХМ на режимах регулирования частотой вращения ротора и с помощью ВРА. Методика реализована при аппроксимации регулировочных характеристик ХМ 10ТХМВ-4000-2. Отклонение характеристик, полученных в результате аппроксимации, от расчетных не превышало ~0-5%.

Разработан алгоритм определения параметров регулирования на этапе оперативного управления. Благодаря своей компактности программа этого этапа может быть реализована на сравнительно маломощных ЭВМ, входящих в автоматизированную систему управления холодильной машины.

ГЛАВА 3 посвящена экспериментальным исследованиям холодильных машин типа ТХМВ. Основной целью этой части работы являлась проверка работоспособности предложенной математической модели ХМ. Экспериментальные исследования проводились на стенде Казанского компрессорного завода в условиях, максимально соответствующих условиям эксплуатации. Были испытаны две натурные холодильные машины: 10ТХМВ-4000-2 и тепловой насос ТХМТ-4000, спроектированный на базе этой холодильной машины. Исследовались режимы без регулирования и с регулированием холодопроизводительности с помощью ВРА.

Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм обработки резуль-

татов эксперимента и получения экспериментальных характеристик ХЦК и ХМ в целом в виде зависимостей холодопроизводительности, теплового потока в конденсаторе, а также внутренней мощности и холодильного коэффициента от температур кипения, конденсации, хладо- и теплоносителя:

$$Q_0, Q_k, N_i, \varepsilon_i = f(t_0, t_k, t_{s2}, t_{w1}, \theta_\lambda),$$

а также характеристик теплообменных аппаратов в виде зависимостей коэффициентов теплопередачи от плотностей тепловых потоков:

$$K_0, K_k = f(q_{f0}, q_{fk}).$$

На базе разработанной математической модели были получены расчетные характеристики ХМ на режимах без регулирования и с регулированием для условий эксперимента. Результаты сопоставления экспериментальных данных и расчетных характеристик ХМ, полученных с использованием математической модели, позволили сделать вывод о правомерности использования разработанной математической модели для расчета регулировочных характеристик ХМ.

В ГЛАВЕ 4 методика расчета регулировочных характеристик использована для анализа эффективности работы ХМ на нерасчетных режимах на примере ХМ 10ТХМВ-4000-2. Рассматривались три указанных выше способа регулирования: частотой вращения, с помощью ВРА и совместно частотой вращения и ВРА. Характеристики ХМ были получены для трех вариантов условий эксплуатации.

Эффективность работы ХМ на различных режимах оценивалась с помощью холодильного коэффициента ε_i .

На рис.1 приведены характеристики ХМ для варианта условий эксплуатации с $t_{w1} = \text{const}$; $Q_0 = \text{var}$ в виде зависимости ε_i от относительной холодопроизводительности $\bar{Q}_0$. Уменьшению $\bar{Q}_0$ соответствует (из условия сохранения t_{w1} и t_{s2}) увеличение угла поворота лопаток θ_λ до некоторого предельного значения $\theta_{\lambda \text{ пред.}}$, которое может быть достигнуто без наступления помпажа. Дальнейшее уменьшение $\bar{Q}_0$ может быть получено байпасированием (что на рисунке соответствует прямой, проходящей через начало координат).

При уменьшении температуры теплоносителя t_{w1} и неизменных других условиях работы ХМ происходит снижение температуры конденсации t_k , ХЦК работает на меньший температурный перепад, затрачивая при этом меньшую работу. При этом холодильный коэффициент ХМ тем выше, чем ниже температура теплоносителя. Снижение

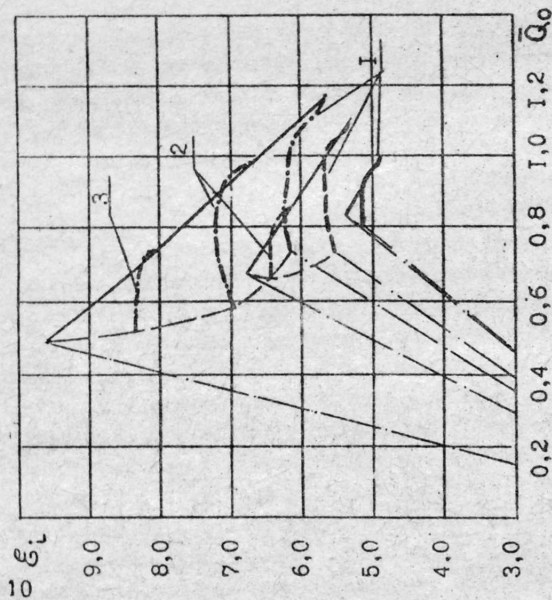


Рис.1. Характеристики ХМ 10ТХМВ-4000-2

при регулировании;

с помощью ВРА для

$t_{\text{вк}} = 30^\circ \text{C}$; $---$ $t_{\text{вк}} = 25^\circ \text{C}$; $- \cdot -$ $t_{\text{вк}} = 20^\circ \text{C}$

при: 1- $\bar{n} = 1,0$; 2- $\bar{n} = 0,9$; 3- $\bar{n} = 0,8$;

— изменением частоты вращения ротора компрессора

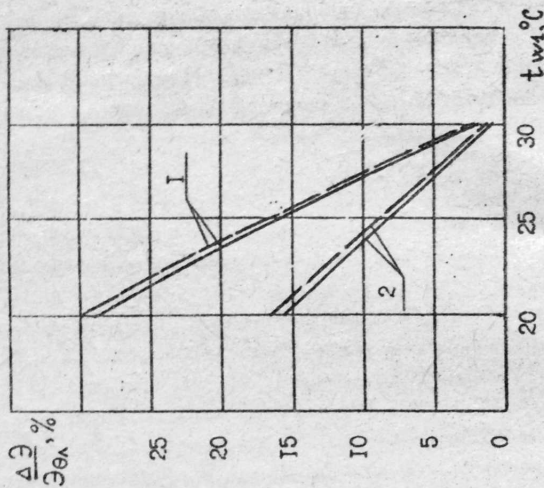


Рис.2. Экономия энергии при регулировании

— изменением частоты вращения ротора;

--- изменением частоты совместно с ВРА

по отношению к затратам энергии при регули-

ровании только ВРА для графиков загрузки с

1 - глубоким; 2 - средним регулированием.

температуры теплоносителя приводит также к увеличению запаса по помпажу и увеличению предельного угла поворота лопаток ВРА.

С уменьшением частоты вращения характеристика ХЦК смещается в сторону меньших расходов и меньших удельных работ. При этом снижение температурного перепада, на который работает ХЦК, ограничивается предельной температурой конденсации, в основном определяемой температурой охлаждающей воды и Q_0 . Это приводит к сужению зоны регулирования компрессора с помощью ВРА, которая в пределе сводится к точке. С уменьшением частоты вращения не происходит увеличения потерь на входе в колесо, воздействие на характеристики обеих ступеней пропорциональное, и в результате этого получается выигрыш в холодильном коэффициенте по сравнению с регулированием ВРА. Регулировочные характеристики для $\bar{n} > 1,0$ располагаются в области больших холодильных коэффициентов.

Особенностью характеристик (рис.1) является то, что для фиксированного значения Q_0 максимальный холодильный коэффициент достигается при некотором ненулевом угле поворота лопаток. Т.о. совместное регулирование частотой вращения и с помощью ВРА дает выигрыш в эффективности работы ХМ.

Чтобы оценить эффективность работы ХМ при регулировании различными способами, для реальных графиков загрузки и режимов эксплуатации по формуле (1) были вычислены затраты энергии.

Расчеты показали, что для всех вариантов условий эксплуатации регулирование частотой вращения дает существенный выигрыш по затратам энергии по сравнению с регулированием только с помощью ВРА. Вместе с тем комбинированное регулирование одновременно ВРА и $\bar{n}$ не приводит к заметной экономии энергии по сравнению с вариантом регулирования только частотой вращения. При этом затраты энергии определяются реальными графиками загрузки и длительностью работы ХМ на режимах глубокого регулирования.

На рис.2 на примере варианта условий эксплуатации с $t_{w1} = \text{const}$; $Q_0 = \text{var}$ для графиков загрузки с глубоким и средним регулированием показан выигрыш в затратах энергии при регулировании частотой вращения и комбинированным способом по сравнению с регулированием только ВРА. При $t_{w1} = 25^\circ$ экономия энергии для графика загрузки с глубоким регулированием составила 15,8%, дополнительный выигрыш энергии от комбинированного регулирования составляет 0,58%. Для графика со средним регулированием эти зна-

чения составили соответственно 8,04 и 0,75%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при решении задачи плавного изменения частоты вращения ротора появляется возможность отказа от ВРА. Для окончательной оценки такого решения потери энергии по сравнению с оптимальным вариантом регулирования требуется сопоставить по стоимости с затратами на установку и управление ВРА, а также оценить затраты, связанные с регулированием частоты вращения электродвигателя.

В работе производилась оценка влияния согласования характеристик ступеней ХЩК на эффективность работы ХМ при регулировании только с помощью ВРА. Сравнивалась работа пяти холодильных машин. За контрольный вариант принята ХМ 10ТХМВ-4000-2, характеристики которой на расчетном режиме согласованы оптимальным образом, т.е. по максимальному КПД:

$$1 - \bar{\Psi}_{s1}^* = \Psi_{s1}^* / \Psi_{s1opt}^* = 1,0; \bar{\Psi}_{s2}^* = \Psi_{s2}^* / \Psi_{s2opt}^* = 1,0 \quad (12)$$

Параметры (частота вращения и геометрия рабочих колес) других ХМ подобраны так, чтобы выполнялись следующие условия согласования характеристик ступеней на расчетном режиме:

$$2 - \bar{\Psi}_{s1}^* = 1,0; \bar{\Psi}_{s2}^* = 0,91; \quad 3 - \bar{\Psi}_{s1}^* = 1,0; \bar{\Psi}_{s2}^* = 0,82;$$

$$4 - \bar{\Psi}_{s1}^* = 0,91; \bar{\Psi}_{s2}^* = 0,91; \quad 5 - \bar{\Psi}_{s1}^* = 0,82; \bar{\Psi}_{s2}^* = 0,82.$$

На рис.3 приведены характеристики холодильных машин для условия эксплуатации с $t_{w1}=30^\circ\text{C}$, $Q_0=\text{var}$. Контрольный вариант (кривая 1) обеспечивает на режимах регулирования максимальную эффективность, но предельный (из условия помпажа) угол поворота лопаток ВРА при этом соответствует всего $\theta_A=35^\circ$ и глубина регулирования $Q_0=0,8$. Варианты согласования 2...5 обеспечивают меньшую эффективность (это обусловлено не только отклонением от оптимального режима работы ступеней, но и уменьшением ширины проточной части и ростом условных чисел M_u), но предельный угол закрутки и глубина регулирования увеличиваются.

На рис.4(а,в) показано изменение затрат энергии ХМ для реальных графиков загрузки и условий эксплуатации, рассчитанное по формуле (1) для всех пяти ХМ. Анализ результатов показывает, что снижение затрат энергии происходит в основном за счет небольшого отклонения от оптимума (кривая 2 на рис.3) согласования второй ступени. При этом снижение эффективности перекрывается уменьшением потерь от байпасирования из-за увеличения зоны запаса по помпажу на характеристике ступени и, соответственно,

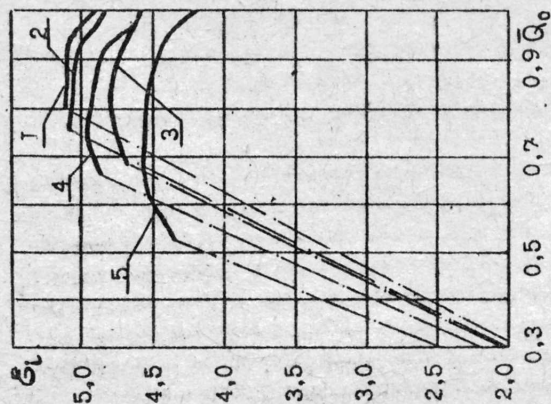


Рис.3. Характеристики XM типа TXMB-4000 на режимах регулирования с помощью БРА для различных вариантов согласования характеристик ступеней компрессора:

- 1- $\bar{\Psi}_{s1}=1,0$; $\bar{\Psi}_{s2}=1,0$;
- 2- $\bar{\Psi}_{s1}=1,0$; $\bar{\Psi}_{s2}=0,91$;
- 3- $\bar{\Psi}_{s1}=1,0$; $\bar{\Psi}_{s2}=0,82$;
- 4- $\bar{\Psi}_{s1}=0,91$; $\bar{\Psi}_{s2}=0,91$;
- 5- $\bar{\Psi}_{s1}=0,82$; $\bar{\Psi}_{s2}=0,82$.

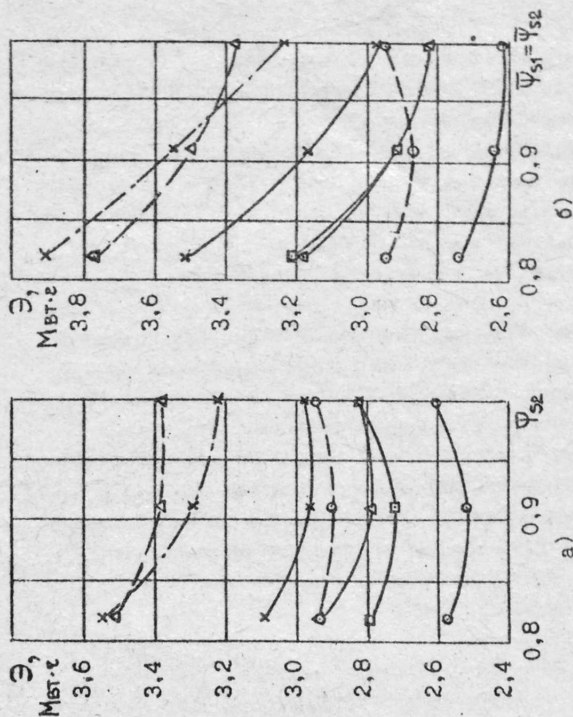


Рис.4. Затраты энергии для различных вариантов согласования характеристик ступеней компрессора
Варианты условий эксплуатации:

- $Q_0 = \text{const}; t_w = \text{var}$;
- $Q_0 = \text{var}; t_w = \text{const}$ (график загрузки: о-1; Δ-2)
- $Q_0 = \text{var}; t_w = \text{var}$ (график загрузки: о-1; Δ-2; □-3; ×-4)

расширения области регулирования. В свою очередь, эти потери тем больше, чем дольше ХМ работает в режиме глубокого регулирования, что определяется реальными графиками загрузки.

Дальнейшее отклонение от оптимума согласования второй ступени (кривая 3) или первой и второй вместе (кривые 4,5) ведет к существенному снижению эффективности, которое не компенсируется расширением зоны регулирования.

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать оптимальные параметры согласования ступеней ХЦК с учетом реальных графиков загрузки. Расчеты показывают, что для ХМ типа ТХМВ наименьшие затраты энергии можно получить при выборе параметров первой ступени по максимальному КПД: $\Psi_{s1}^* = \Psi_{s1}^* \text{opt}$ и отклонении параметров второй ступени от оптимума в диапазоне $\Psi_{s2}^* = (0,9 \dots 0,95) \Psi_{s2}^* \text{opt}$. При этом для графиков загрузки со средней глубиной регулирования холодопроизводительности выбором проточной части ХЦК удается добиться снижения затрат энергии до 1,3 %, а для графиков загрузки с глубоким регулированием экономия энергии возрастает до 3,7%, что составляет соответственно 37 и 97 МВт*час на одну машину в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ и систематизированы нерасчетные режимы работы ХМ, что позволило выделить три основных варианта условий эксплуатации.

2. Разработана расчетная методика получения регулировочных характеристик ступеней ХЦК по характеристикам с нулевым углом закрутки. Достоверность получаемых результатов подтверждена экспериментально.

3. Созданы банки для ЭВМ характеристик ЦК ХМ типа ТХМВ на режимах регулирования изменением угла закрутки потока с помощью ВРА, частотой вращения ротора и для различных вариантов согласования характеристик ступеней компрессора на расчетном режиме.

4. Математическая модель ХМ обобщена на случай нерасчетных режимов. Для различных условий эксплуатации ХМ разработаны методики, алгоритмы и программы получения регулировочных характеристик ХМ, не требующие графоаналитических построений.

5. Разработан алгоритм использования регулировочных харак-

теристик ХМ для автоматического определения требуемых значений регулировочных параметров, ориентированный на применение в автоматизированных системах управления холодильными машинами.

6. Разработана методика проведения испытаний ХМ типа ТХМВ4000-2 в условиях завода-изготовителя. Созданы методика, алгоритм и программы обработки на ЭВМ экспериментальных данных

7. Проведены экспериментальные исследования ХМ: ТХМТ-4000 и 10ТХМВ-4000-2 на расчетных и нерасчетных режимах работы.

8. Сопоставление характеристик ХМ, полученных в результате расчета по разработанной математической модели, и результатов эксперимента подтвердило правомерность использования математической модели ХМ для расчета регулировочных характеристик.

9. Проведены расчетно-теоретические исследования работы ХМ типа ТХМВ на режимах регулирования с помощью ВРА при реальных условиях эксплуатации для различных вариантов согласования характеристик ступеней ХЦК. Разработана и реализована методика определения оптимального варианта согласования характеристик ступеней. Показано, что для графиков загрузки ХМ с глубоким регулированием выбором проточной части ХЦК может быть получена экономия энергии порядка $\sim 4\%$, что составляет 97 МВт*час на одну машину в год.

10. Проведен анализ эффективности работы ХМ типа ТХМВ на нерасчетных режимах при реальных графиках загрузки и различных условиях эксплуатации для трех вариантов регулирования: с помощью ВРА, частотой вращения и совместно ВРА и частотой вращения. Показано, что при комбинированном регулировании удается оптимизировать работу холодильной машины.

11. Показано, что для всех вариантов эксплуатации уменьшение расхода энергии при комбинированном регулировании только на 0,5...1% меньше того, которого можно добиться регулированием только частотой вращения. При использовании высокочастотных двигателей, допускающих эффективное плавное изменение частоты вращения, в ХМ типа ТХМВ можно отказаться от использования ВРА.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Метод расчета характеристик и оптимизации холодильных турбомашин/И.Ю.Савельева, И.Я.Сухомлинов, Ф.М.Чистяков,

Б.Л.Пирлин // Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок: Тезисы докладов Седьмой Всесоюзной научно-технической конференции. Казань, 1985. С.106-107.

2. Математическое моделирование при создании и освоении холодильных центробежных компрессорных агрегатов / И.Я.Сухомлинов, М.В.Головин, И.Ю.Савельева, Д.Л.Славуцкий//Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса: Тезисы докладов Восьмой Всесоюзной научно-технической конференции. -Сумы, 1989. -С.41-42.

3. Савельева И.Ю., Сухомлинов И.Я. Автоматизация расчета характеристик ступеней ХЦК для пароконденсационных турбохолодильных машин на режимах регулирования/ Всесоюз. научно-иссл. ин-т холод. машиностр.-М., 1991.-19с. -Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш 9.04.91, N2187.

4. Савельева И.Ю., Сухомлинов И.Я., Чистяков Ф.М. Математическая модель пароконденсационных турбохолодильных машин и ее реализация для различных условий эксплуатации/ Всесоюз. научно-иссл. ин-т холод. машиностр.-М.,1991.-15с. -Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш 9.04.1991,N2188.

5. Савельева И.Ю., Сухомлинов И.Я., Александровский П.Г. Разработка алгоритмов управления для систем автоматического регулирования турбохолодильных машин//Гидродинамика больших скоростей: Материалы всесоюзного научно-технического семинара "Повышение эффективности тягодутьевого оборудования для энергетики и машиностроения".-Красноярск, 1991.-С.90-91.

6. Назаренко Н.И.,Савельева И.Ю.,Сухомлинов И.Я. Анализ эффективности холодильных турбомашин на нерасчетных режимах работы // Холод народному хозяйству: Тезисы докладов Всесоюзной новой научно-технической конференции. -Л., 1991. -С.66.

Подписано к печати 21.01.1992 г. 3 экз. 36.

Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз. Типография МГТУ.